UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E DELL'ARCHITETTURA (DICEA)

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Valutazione della resistenza a frattura e termosuscettibilità di conglomerati bituminosi prodotti con lignina

Evaluation of the fracture resistance and thermal susceptibility of asphalt mixtures produced with lignin

Relatore:

Prof. **Francesco Canestrari**

Tesi di laurea di:

Andrea Di Paolo

Correlatore:

Prof. Ing. **Fabrizio Cardone**

Ing. **Elena Gaudenzi**

Anno accademico 2021/2022

Sommario

Introduzione ... 3

Conglomerati bituminosi per applicazioni stradali ... 5

1.1 Pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso ... 5

1.2 Aggregati ... 9

1.3 Leganti ... 11

1.4 Bio-leganti ... 14

Stato dell'arte ... 16

2.1 Bio materiali nelle applicazioni stradali ... 16

2.2 La lignina come bio-legante ... 18

2.3 Impiego della lignina in letteratura ... 20

Indagine sperimentale ... 23

3.1 Inquadramento del progetto ... 23

3.2 Materiali ... 24

3.2.1 Bitumi ... 24

3.2.2 Lignina ... 24

3.2.3 Aggregati ... 26

3.3 Apparecchiature e metodi ... 29

3.3.1 ITSM -Indirect Tensile Stifness Modulus ... 29

3.3.2 Semi-circular Bending SCB ... 43

3.4 Programma Sperimentale ... 51

Risultati della sperimentazione ... 54

4.1 Prove ITSM ... 55

4.2 Prove SCB ... 65

4.2.1 Fracture thoughness ... 65

4.2.2 Fracture Energy ... 71

Conclusioni ... 77

Bibliografia ... 79

Introduzione

Sostenibilità ed economia circolare sono oggi due principi da perseguire in tutti i campi. Per garantire di arrivare ad avere emissioni zero nel 2050 green new deal si ha la necessità di ricercare fonti alternative e rinnovabili. Nel corso degli ultimi decenni, infatti uno dei più grandi problemi verificatisi è la crescente domanda di risorse esauribili come il petrolio e i suoi derivati, pertanto, deriva la necessità di ricercare fonti che garantiscono la salvaguardia e la rigenerazione di tali risorse nel tempo. Tale problema ha portato a notevoli problematiche ambientali, che si sono ripercosse anche nell'ingegneria civile nel settore delle infrastrutture di trasporto. Infatti, il bitume – un derivato del petrolio - è il materiale fondamentale per la realizzazione delle pavimentazioni stradali flessibili in quanto viene impiegato come legante, quindi numerosi ricercatori si sono domandati se esistono alternative al bitume da poter impiegare nelle pavimentazioni stradali. Per perseguire tale scopo, si intende abbandonare gradualmente l'impiego di materiali derivanti da combustibili fossili, prediligendo quelli di origine organica rinnovabile, essendo essi al tempo stesso economici e rispettosi dell'ambiente, senza penalizzarne l'efficienza e le prestazioni.

Il bio-leganti (in inglese bio-binder) è un legante alternativo, concepiti come potenziali sostituti del bitume, poiché estratti da biomassa o da rifiuti organici, risorse onnipresenti e rinnovabili. Infatti, l'impiego di bio-leganti andrebbe a ridurre le emissioni di CO_2 durante le varie fasi di lavorazione del petrolio, andando quindi a ridurre la concentrazione dei gas serra nell'atmosfera. Tra i materiali in questione si annoverano quelli provenienti da legno di scarto, rifiuti animali, rifiuti della vita quotidiana, ma si possono ottenere anche da soia, colza, mais, oli da cucina esausti, ecc.

La presente Tesi di Laurea si occupa di studiare il comportamento dei bio-leganti ottenuti dalla parziale sostituzione di bitume con la lignina.

La lignina è considerata il secondo bio-polimero più diffuso sulla Terra e rappresenta un bio-materiale a tutti gli effetti in quanto non è nociva e può essere facilmente reperibile in natura, infatti, generalmente, viene ottenuta da materiali di scarto come il legno, la carta, il mais, la paglia, ma anche dalle industrie di biocarburanti e dai processi agricoli.

Nello specifico, la presente tesi si concentra sullo studio di due miscele in conglomerato bituminoso contenenti bio-leganti a base di lignina, che vengono confrontate con una miscela tradizionale di riferimento. Più precisamente, due bitumi tradizionali di classe di consistenza 70/100 e 100/150 sono stati rispettivamente miscelati con due tipi di lignina (S e B) di diversa provenienza secondo la proporzione 70% di bitume e 30% di lignina. L'ottimizzazione della fase legante ha avuto luogo durante un precedente lavoro di tesi, ed aveva come obiettivo la massimizzazione del contenuto di lignina al fine di ottenere una consistenza confrontabile con un bitume 50/70 di riferimento. In seguito all'ottimizzazione del mix design, sono state confezionate tre miscele in conglomerato bituminoso denominate come 50/70,70/100_S e 100/150_B, e sono state considerate sia le condizioni non invecchiate che quelle invecchiate.

I provini (precedentemente confezionati) testati in questo lavoro di tesi, sono stati sottoposti a prove di caratterizzazione meccanica. Le proprietà delle bio-miscele sono state studiate studiate e confrontate con la miscela di riferimento, indagando sia le condizioni "tal quali" che di invecchiamento a lungo termine.

Dunque, l'i obiettivo da raggiungere nella presente sperimentazione riguarda la caratterizzazione meccanica di bio-miscele in conglomerato bituminoso contenenti bio-leganti ottenuti con lignina. Precisamente, sono stati valutati gli effetti dell'invecchiamento e della suscettibilità termica, attraverso Prove di Modulo a Trazione Indiretta e prove di Resistenza a frattura tramite Semi-Circular Bending Test

Il presente elaborato è strutturato in cinque capitoli oltre all'introduzione:

1. Capitolo 1: "Conglomerati bituminosi per applicazioni stradali", relativo alla descrizione dell'impiego dei conglomerati bituminosi in campo stradale e dei materiali impiegati per la sua realizzazione: aggregati, leganti e/o bio-leganti;
2. Capitolo 2: "Stato dell'arte" in cui viene presentato il bio-materiale impiegato nella sperimentazione, ovvero la lignina;
3. Capitolo 3: "Indagine sperimentale", in cui vengono descritti i materiali impiegati, le apparecchiature e i metodi utilizzati e viene descritta l'indagine sperimentale;
4. Capitolo 4: "Risultati della sperimentazione", relativo alla presentazione e discussione dei risultati ottenuti dalle prove effettuate sui conglomerati bituminosi tradizionali e non;
5. Conclusioni.

Capitolo 1
Conglomerati bituminosi per applicazioni stradali

1.1 Pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso

La pavimentazione stradale, o sovrastruttura, è la parte superiore del corpo stradale, realizzata normalmente in più strati e direttamente interessata dal moto dei veicoli. Essa è costituita da un insieme di strati in conglomerato bituminoso (miscela formata da aggregati lapidei di varia granulometria legati tra loro dal bitume) poggiati su una fondazione in materiale granulare non legato. Per tutto l'arco della vita di esercizio, la pavimentazione deve poter garantire con la massima efficienza le sue funzionalità, la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di confort e sicurezza, rispettando sia requisiti strutturali che funzionali.

I requisiti richiesti riguardano:

- funzioni strutturali: distribuzione delle azioni indotte dal traffico al sottofondo, la portanza, ovvero, la capacità di sopportare i carichi veicolari, la durabilità, cioè la resistenza ai fenomeni di degrado entrambi causati dalla tipologia di sovrastruttura, da carichi ciclici e da sollecitazioni di natura termica
- funzioni superficiali e funzionali: protezione del sottofondo stradale dalle azioni dell'acqua e del gelo, garanzia di regolarità e aderenza pneumatico-piano di rotolamento, al fine di raggiungere sicurezza e confort di marcia.

Inoltre, la sezione stradale deve essere progettata in modo che tutte le forze presenti siano assorbite e trasmesse al sottofondo senza causare danni. Tra le principali funzioni che la strada deve essere in grado di svolgere, si riconoscono:

- Dissipazione dei carichi delle ruote: quando un veicolo è in movimento o staziona su una pavimentazione stradale, i suoi pneumatici devono trasferire il peso del veicolo o le forze dinamiche prodotte in accelerazione ed in decelerazione sulla superficie stradale, la quale dovrà quindi assorbirli. La pavimentazione stradale distribuisce in modo uniforme questi carichi e forze sugli strati sottostanti, ed infine sul sottofondo. Una scelta corretta dei materiali e degli spessori degli strati assicura che le sollecitazioni non siano eccessive.
- Assorbimento delle sollecitazioni a compressione e trazione: la maggior parte dei materiali utilizzati nella costruzione delle strade presenta un comportamento elastico. Ciò significa che un carico causa una certa deformazione del materiale, il quale poi ritornerà alla sua forma originale, in seguito alla rimozione di tale carico. Nel caso delle strade, queste deformazioni sono causate dal flusso del traffico. Pertanto, la strada è soggetta a sollecitazioni di compressione e di trazione come anche a carichi puramente orizzontali. Poiché queste sollecitazioni tendono ad essere maggiori sugli strati superiori della strada rispetto agli strati inferiori, i materiali di questi strati dovranno presentare una resistenza elevata ai carichi di compressione come pure elevata resistenza alla trazione. Per ottenere queste resistenze gli aggregati in questi strati devono essere giocoforza legati, a differenza degli strati inferiori.

La pavimentazione ha un arco di vita utile nel quale, se progettata in maniera corretta, è capace di mantenere i requisiti prestazionali. In alcuni casi, però, anche durante questo arco di tempo si possono verificare fenomeni di degrado, generati soprattutto dall'azione combinata del traffico e dalle sollecitazioni di natura termica. I fattori ambientali possono interessare gli strati superficiali della sovrastruttura: i raggi ultravioletti favoriscono l'indurimento e l'invecchiamento precoce del bitume riducendo la propria elasticità e in seguito agli sforzi di compressione e dilatazione (aumentati dalle continue sollecitazioni termiche) favoriscono la fessurazione del manto stradale. Anche i carichi veicolari contribuiscono all'aumento di fessurazioni e deformazioni a fatica, dovute soprattutto dalle sollecitazioni cicliche indotte dal passaggio degli automezzi più pesanti. Le strade sono soggette ad elevate sollecitazioni a causa degli effetti del clima e del traffico che, con il tempo, causano fatica ed usura con danni a lungo termine. Sulle strade urbane, questo processo è spesso accelerato dalla rottura della superficie, poiché l'acqua può penetrare nel corpo stradale. Inoltre, una cattiva progettazione e realizzazione scadente possono causare una sensibile riduzione della vita utile della strada. I tipi di danni che si riscontrano con maggior frequenza si possono essenzialmente dividere in: ormaie, fessurazioni da fatica e fessurazioni termiche. Le

ormaie consistono nell'accumulo di depressioni permanenti che si formano lungo la traiettoria percorsa dalle ruote dei veicoli, a causa della perdita di rigidezza del materiale attribuibile ad elevate temperature di esercizio. Le Fessurazioni da fatica sono tipiche delle temperature intermedie, si presentano visivamente come una serie di fessure diffuse sulla superficie del manto stradale, e per questo vengono generalmente chiamate a " pelle di coccodrillo". Esse si manifestano nelle zone soggette ai carichi di traffico ripetuti. Si innescano sul fondo degli strati di conglomerato bituminoso dove lo stato tenso-deformativo di trazione è maggiore, e si propagano fino alla superficie. Le fessurazioni termiche si manifestano come conseguenza di una brusca diminuzione della temperatura fino a valori estremamente bassi (fessurazione per basse temperature o low-temperature cracking), oppure a causa della fatica termica indotta dalle escursioni termiche giornaliere ripetute nel tempo. Dato che tra i vari fenomeni di degrado esiste una stretta correlazione, è necessario intervenire in maniera tempestiva appena si verifica il dissesto con delle tecniche preventive di manutenzione e gestione delle pavimentazioni stradali, prima che i danni compromettono l'intero pacchetto stradale.

Tradizionalmente la pavimentazione stradale è costituita da più strati sovrapposti realizzati con materiali differenti in cui ciascuno assolve funzioni specifiche e presenta pertanto caratteristiche peculiari, che possono differire sia in funzione della tipologia costruttiva della sovrastruttura stradale che in funzione delle sollecitazioni di traffico e ambientali. Sulla base delle caratteristiche dei materiali costituenti e dello spessore degli strati si distinguono tre tipologie costruttive di pavimentazioni:

- Flessibili,
- Semi-rigide,
- Rigide.

In generale, risalendo dalle quote più profonde verso la superficie, si possono individuare i seguenti strati di qualità crescente (Figura 1.1):

- Sottofondo;
- Fondazione;
- Base;
- Binder o strato di collegamento;
- Usura

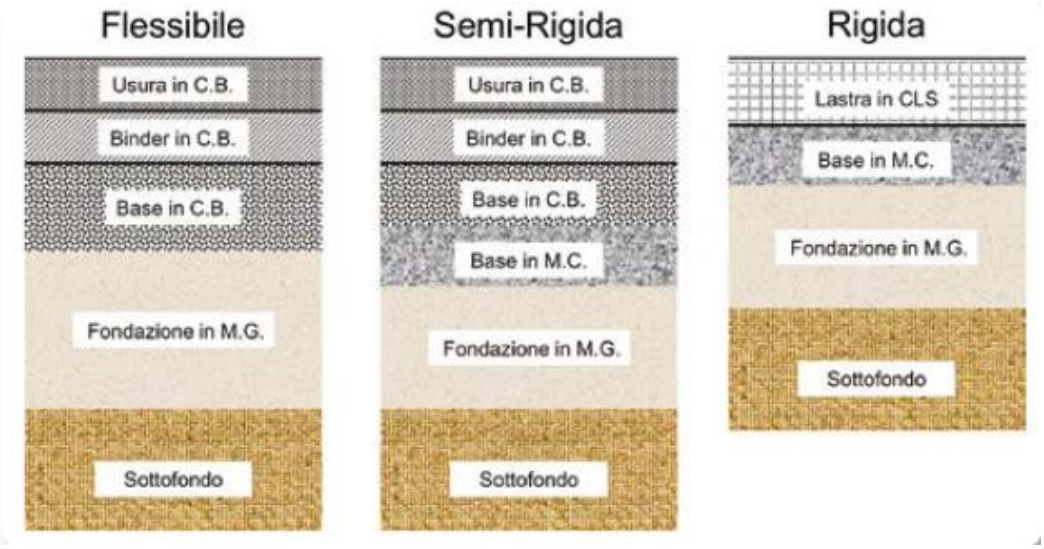


Figura 1.1- Rappresentazione grafica degli strati del pacchetto stradale

La maggior parte delle strade della rete viaria urbana ed extraurbana sono costituite da pavimentazioni flessibili con lo strato di usura in conglomerato bituminoso che si appoggia su uno strato di binder o di collegamento e uno strato di base, anch'essi in conglomerato bituminoso, ed infine, lo strato di fondazione in misto granulare stabilizzato o non stabilizzato che trasferisce i carichi al sottofondo. Questo tipo di pavimentazione permette una più graduale distribuzione dei carichi al piano di sottofondo rispetto alle altre due tipologie.

Il meccanismo di resistenza che governa tale tipo di pavimentazione è basato sul concetto di flessibilità, ovvero la pavimentazione deve essere in grado di resistere ai carichi senza deformarsi né fessurarsi e deve essere in grado di flettersi efficacemente a seguito dell'applicazione dei carichi di traffico senza superare la resistenza a trazione nella zona di massima tensione, ovvero alla base degli strati legati.

Come precedentemente indicato, negli strati legati della pavimentazione flessibile viene impiegato il conglomerato bituminoso, una miscela accuratamente proporzionata di aggregati lapidei, filler, legante bituminoso ed eventualmente additivi, generalmente confezionata a caldo in specifici impianti. Il conglomerato bituminoso è composto principalmente da uno scheletro solido costituito dagli aggregati lapidei immersi in una matrice legante costituita dal bitume che garantisce consistenza e coesione alla miscela conferendo quindi un comportamento visco-elastico con risposta reologica variabile in funzione dei modi e dei tempi di applicazione dei carichi, nonché della temperatura

1.2 Aggregati

Gli aggregati rappresentano la fase solida dei conglomerati e sono costituiti da particelle granulari di origine minerale, le quali costituiscono l'80-85% del volume delle miscele e circa il 95% del peso.

Riguardo la loro natura, gli aggregate possono essere classificati in:

- Naturali: materiali ricavati da rocce con particolari caratteristiche di resistenza mediante un processo di frantumazione artificiale ed una successiva vagliatura, o direttamente da rocce sciolte. Questo tipo di aggregati viene impiegato soprattutto negli strati più superficiali, perché garantisce migliori caratteristiche meccaniche.
- Artificiali: questi aggregati sono prodotti mediante processi industriali e le proprietà di tali aggregati possono differire in base al prodotto di origine e al tipo di lavorazione. Esiste la possibilità di progettarli "su misura" con determinate proprietà pre-richieste. Alcuni esempi sono: loppa d'altoforno, ceneri volanti, argilla espansa, polistirolo etc.
- Riciclati: sono ottenuti da materiali di C&D (Construction and Demolition) o derivanti dalla rimozione di pavimentazioni esistenti da cui si ottiene il cosiddetto fresato o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). L'impiego di materiali riciclati per la produzione di miscele bituminose si è diffuso negli ultimi decenni e il fresato ne costituisce il componente principale. Il fresato, infatti, è il materiale recuperato mediante fresatura dagli strati ammalorati della pavimentazione e proviene solitamente dagli strati di base, binder e usura. Questo materiale utilizzato in sostituzione agli aggregati naturali, presenta numerosi vantaggi tra i quali: la riduzione dell'impiego di materie prime vergini, la riduzione delle problematiche e dei costi legati allo smaltimento del materiale (infatti in discarica verrebbe trattato come rifiuto speciale), la riduzione dei costi di trasporto in caso di riciclaggio a freddo in situ. Dunque, il fresato viene ottenuto da tecniche di riciclaggio classificate in base alla temperatura, distinguendo il riciclaggio a caldo dal riciclaggio a freddo, e in base al luogo di confezionamento che può essere in situ o in impianto.

Per gli utilizzi in ambito stradale è importante conoscere quelle caratteristiche specifiche (proprietà, requisiti) che possono essere collegate alle prestazioni in opera delle miscele.

Si è soliti distinguere in proprietà:

- Geometriche;
- Fisiche;
- Meccaniche.

Geometriche: la distinzione tra aggregati grossi e fini è fondamentale in quanto la grandezza del

granulo condiziona il suo ruolo all'interno dell'ammasso, sia esso legato o meno, e dunque le proprietà che lo caratterizzano in maniera più significativa. Tra i requisiti geometrici, la norma UNI EN 12620 definisce gli aggregati in base al diametro minimo (d) e massimo (D) di una frazione di aggregato, secondo le seguenti classi:

-Aggregato GROSSO: $D \geq 4mm$, $d \geq 1mm$;

-Aggregato FINE: $D \leq 4mm$ $d=0$;

-FILLER: frazione per la maggior parte passante al setaccio 0,063mm.

Queste definizioni variano leggermente tra le diverse norme (ad esempio per la UNI EN 13242: Aggregato FINE: $D \leq 6$; 3mm).

Fisiche: per gli aggregati lapidei si possono definire quelle grandezze aventi significato fisico di una massa volumica, ovvero legate ai valori di massa e volume del materiale.

Meccaniche: proprietà relative alla resistenza meccanica, resistenza a fatica, resistenza all'usura, resistenza all'urto, durezza.

1.3 Leganti

Un legante idrocarburico è generalmente un materiale adesivo contenente bitume. Il bitume è un legante, che può esistere allo stato naturale, formato in seguito a fenomeni geologici naturali, altrimenti può derivare da origini industriali, ovvero ricavato dai processi di distillazione del petrolio grezzo. Quest'ultimo metodo è quello maggiormente utilizzato. Le caratteristiche dei bitumi provenienti dalla raffinazione del petrolio dipendono decisamente dalla tipologia di greggio di partenza e dal processo di produzione utilizzato. In particolare, la composizione dei greggi risulta fortemente variabile, persino nell'ambito della stessa zona di produzione.
Il bitume si presenta con un colore bruno o nerastro e dal punto di vista chimico-fisico può essere raffigurato come un sistema multifase che comprende una componente oleosa (saturi e aromatici) all'interno della quale sono disperse sostanze insolubili dette asfalteni ricoperti di resine (Figura 1.2). L'insieme di saturi, aromatici e resine viene definita malteni. Ogni componente svolge una specifica funzione: gli asfalteni sono strutture complesse che definiscono il comportamento del bitume al variare della temperatura, ottenendo dunque un comportamento viscoso, elastico o plastico, stabilendo anche la resistenza alle sollecitazioni meccaniche. I saturi e gli aromatici sono sostanze chimiche che influiscono sul comportamento del bitume alle alte temperature attribuendogli la capacità di ricoprire estese superfici di altro materiale; invece le resine concedono le proprietà adesive, la flessibilità e la duttilità al bitume quando viene sottoposto alle sollecitazioni.

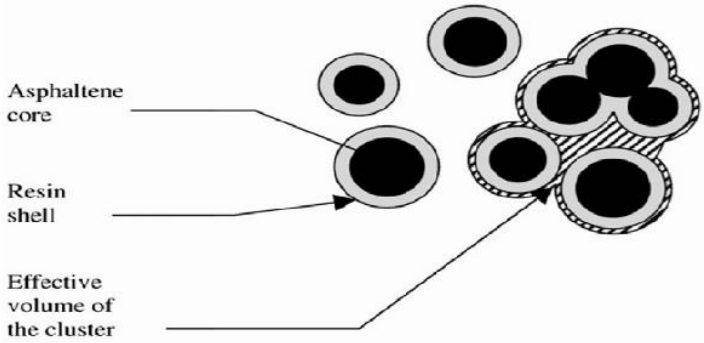


Figura 1.2 - Rappresentazione grafica del sistema multifase del bitume

L'elemento presente in maggior quantità nel bitume è dunque il carbonio (80-88% in peso) e l'idrogeno tra l'8% e il 12%, quindi la presenza di idrocarburi è superiore al 90%. Un altro aspetto importante da considerare nello studio della struttura del bitume è la polarità o apolarità delle molecole: le molecole polari, formano una rete nella struttura del bitume conferendogli le proprietà elastiche, mentre quelle apolari garantiscono la continuità della struttura e aumentano le proprietà viscose. È importante definire la struttura del bitume in quanto ogni prodotto immesso

nel mercato ha proprietà differenti, e le prestazioni in opera di un legante dipendono dalle proprietà fisiche e reologiche del materiale che a loro volta sono funzione della composizione chimica e strutturale. La struttura chimica del bitume può essere rappresentata come un sistema colloidale (modello di Nellensteyn) che risponde alle deformazioni in funzione delle modalità e del tempo di applicazione della sollecitazione. Tale sistema può essere visto come una dispersione degli asfalteni negli oli, infatti tale comportamento è associato proprio alla presenza degli asfalteni: si può immaginare che ognuno di essi sia al centro di una struttura chiamata micella e circondato dalle resine. In base alla quantità di asfalteni e malteni e alla dispersione delle micelle nella fase fluida, si ha un diverso comportamento:

Sistema Sol: si definisce di tipo sol il bitume avente un comportamento di tipo liquido newtoniano a temperature elevate e di fluido molto viscoso ma scarsamente elastico a basse temperature. Le micelle in questo caso sono totalmente disperse all' interno degli oli e non interagiscono tra loro;

Sistema gel: di definisce di tipo gel un bitume avente un comportamento di tipo fluido non newtoniano ad alte temperature ed elastico a basse temperature. Ciò accade quando in carenza di resine gli asfalteni si legano tra loro e reticolano interagendo all' interno di una soluzione (costituita da oli)

Nella realtà, il bitume presenta un comportamento intermedio tra queste due forme limite, e in ogni caso dipendente dalla temperatura e dal rapporto tra i costituenti, ovvero asfalteni, resine, aromatici o insaturi.

Il bitume rappresenta una parte fondamentale dei conglomerati bituminosi, è la componente legante che conferisce alle miscele in conglomerato caratteristiche come:

- Aiutare a superare l'attrito interno della miscela minerale, quando si posa e si compatta la miscela;
- Legare saldamente e permanentemente la miscela posata (mantenere la posizione);
- Legare saldamente e permanentemente tutti gli aggregati e la superficie finita;
- Sigillare il manto d'usura finito e gli starati sottostanti per evitare la penetrazione dell'acqua;
- Ammortizzare l'impatto del traffico;
- Ridurre le sollecitazioni causate da variazioni della temperatura;
- Evitare deformazioni permanenti

Inoltre, il bitume è un materiale termo-dipendente cioè risente delle variazioni di temperatura a cui è sottoposto variando quindi la sua consistenza, infatti si ottiene un materiale:

- Semi-liquido, facilmente lavorabile alle alte temperature di miscelazione e compattazione;
- Semi-solido, alle temperature intermedie di esercizio con una consistenza compatta e resistente.

Il bitume possiede dunque un comportamento visco-elastico associato a una forte dipendenza dalla temperatura e al tempo di applicazione della sollecitazione.
Si può considerare il bitume come un materiale visco-elastico se sottoposto a brevi tempi di carico con deformazione di tipo elastico, al contrario se è sottoposto per lunghi periodi all' effetto dei carichi si comporta come un materiale viscoso con il prevalere di deformazioni irreversibili. Inoltre, esso è un materiale termo-plastico in quanto presenta uno stato solido-fragile a basse temperature e uno stato solido-semisolido a temperatura ambiente, e infine allo stato liquido ad alte temperature.
La natura dei legami chimici tra tali molecole è relativamente debole e tali legami possono essere facilmente rotti mediante riscaldamento o applicando azioni tangenziali, da ciò possiamo spiegare la natura viscoelastica e termoplastica del bitume. È necessario sottolineare che se si spezzano tramite il riscaldamento, nel momento in cui si fornisce raffreddamento essi vengono ripristinati creando una struttura differente da quella iniziale.
Durante la sua vita utile, il bitume è soggetto a fenomeni di invecchiamento causati dall'ossidazione indotta dalla luce e dagli agenti atmosferici. Ciò ne comporta la volatilizzazione delle componenti più leggere e un conseguente indurimento nel tempo, ovvero di un incremento della sua rigidezza e fragilità. Per sopperire a queste possibili problematiche, è possibile agire introducendo degli agenti modificatori del bitume, che ne migliorano le prestazioni anche nel lungo periodo.

La componente esterna più utilizzata per la produzione di leganti modificati è il polimero da cui si ottiene il cosiddetto bitume modificato con aggiunta di polimeri. I polimeri maggiormente utilizzati per la modifica del bitume sono i polimeri termoplastici di tipo plastomerico o elastomerico. I polimeri termoplastici plastomerici sono materiali in cui la deformazione elastica può essere accompagnata anche da una deformazione permanente, relativamente grande. Le principali tipologie di plastomeri più utilizzati sono:

- EVA (etilene-vinilacetato)
- EBA (etilene-butilacrilato)
- EMA (etilene-metilacrilato)
- PIB (polisobutylene).

Per quanto concerne i polimeri termoplastici elastomerici, essi sono materiali in cui la deformazione risulta prevalentemente elastica, dunque si distinguono le seguenti tipologie:

- SBS (stirene-butadiene-stirene)
- SB (stirene-butadiene)
- SIS (stirene-isoprene-stirene)
- SBR (random).

I più utilizzati nei bitumi modificati sono proprio questi ultimi, ovvero i polimeri termoplastici stirenici che danno vita ai "bitumi elastomerizzati".
Altra classificazione viene fatta secondo la percentuale di polimero contenuta nel bitume, distinguendo quindi tre livelli di modifica:

- Soft, quando l'aggiunta di polimero è circa l'1,8%;
- Medium, con aggiunta di polimero del 2,8%;
- Hard, con aggiunta di polimero del 3,8%.

La modifica con polimeri comporta una variazione delle caratteristiche fisiche, chimiche e reologiche del materiale, generalmente migliori rispetto alle caratteristiche di un bitume tal quale, come:

- Minore sensibilità alle escursioni termiche;
- Maggiore resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti;
- Miglior comportamento nei climi freddi;
- Maggiore resistenza a fatica;
- Riduzione della tendenza all'invecchiamento;
- Maggiore adesione tra la componente legante e lapidea.

Grazie a tali caratteristiche si raccomanda l'impiego di bitumi modificati con polimero laddove sono richieste particolari caratteristiche di resistenza meccanica e adesione come per le miscele di conglomerato bituminoso drenante o trattamenti superficiali sottoposti ad elevato traffico veicolare, ma anche nelle nuove opere e risanamento profondo.

1.4 Bio-leganti

Nel settore delle infrastrutture di trasporto, il bitume è il materiale maggiormente utilizzato per la realizzazione delle pavimentazioni flessibili, quindi negli ultimi decenni la crescente domanda di risorse non rinnovabili come il petrolio, ha creato grandi problemi tra cui la ricerca di fonti innovative e rinnovabili che assicurano la salvaguardia e la generazione di tali risorse nel tempo,

volte a minimizzare l'impatto ambientale in termini di consumo di energia e di emissioni, aumentando al contempo la durabilità e massimizzando l'utilizzo di materiali riciclati.
Pertanto, la ricerca scientifica si sta sempre più orientando verso l'idea di sostituire totalmente o parzialmente il legante bituminoso con materiali provenienti da risorse rinnovabili che siano anche più sostenibili verso l'ambiente. A questo fine, si stanno studiando dei leganti alternativi, conosciuti come bio-leganti (in inglese *bio-binder*), come potenziali sostituti del bitume, che possono essere ottenuti come scarti dei processi industriali o come rifiuti della vita quotidiana, in modo da evitare lo smaltimento in discarica. In questo modo si promuove il riciclo dei rifiuti riducendo le spese che le imprese devono sostenere per lo smaltimento di essi in discarica. Un materiale rinnovabile per essere idoneo deve possedere alcuni requisiti di base:

- Non deve comportare rischi per l'ambiente e per la salute e la sicurezza dei lavoratori;
- La miscela contenente bio-legante deve essere riciclabile;
- Le prestazioni del bio-legante rispetto al bitume tal quale devono essere migliori, senza aumentare i costi della miscela finale, oppure a fronte di una leggera diminuzione delle prestazioni il costo deve rimanere invariato;
- Deve essere reperibile in grandi quantità;
- Deve essere compatibile con le caratteristiche del bitume.

I bio-leganti maggiormente studiati sono quelli a base di oli vegetali e prodotti di scarto del legno, ma anche lipidi provenienti da microalghe soprattutto per una sostituzione totale del bitume, mentre per una sostituzione parziale del bitume vengono impiegati lignina, bio-oli derivanti dagli scarti di olio da cucina o dalla lavorazione del letame suino. In particolare, questi leganti per essere idonei come sostituti del bitume devono possedere delle proprietà affini ad esso, dunque sono necessarie sperimentazioni e approfondimenti.

Capitolo 2
Stato dell'arte

2.1 Bio materiali nelle applicazioni stradali

Le prestazioni delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso dipendono dalla qualità dei materiali impiegati e dalla precisione raggiunta durante le fasi di progettazione e costruzione. La scelta dei materiali da impiegare per la produzione di conglomerati bituminosi determina una fase decisiva per la progettazione delle pavimentazioni stradali in quanto vanno ad influenzare le loro proprietà meccaniche e la durabilità nell'arco di tutta la vita utile. La miscela di conglomerato bituminoso è un composto complesso costituito da aggregati, bitume e vuoti. Sebbene le prestazioni globali della miscela di conglomerato bituminoso siano determinate dall'insieme di varie fasi, il legante assume un ruolo molto importante.

Nell'ambito delle pavimentazioni stradali il legante maggiormente impiegato è il bitume, che deriva dal processo di raffinazione del petrolio, una risorsa non rinnovabile e ad alto impatto economico ed ambientale. Per questo motivo negli ultimi decenni uno dei principali sforzi è quello di orientarsi verso soluzioni "verdi", con l'obiettivo di abbracciare i principi della sostenibilità ambientale e dell'economia circolare. Contrariamente all' economia lineare, infatti, che si basa sul modello "make-up-dispose" del consumo delle risorse, l'economia circolare risponde ai principi di minimizzazione dei rifiuti, delle emissioni e delle dispersioni di energia e riparazione, riutilizzo, rigenerazione, rimessa a nuovo e riciclaggio. Questo recente sviluppo sta riscuotendo un crescente interesse da parte dell'industria delle pavimentazioni di conglomerato bituminoso, che si sta muovendo verso l'uso di bio-leganti. Questi ultimi sono definiti come leganti in cui il bitume viene in tutto in tutto o in parte sostituito con varie bio – risorse.

Il loro utilizzo consente di soddisfare i diversi principi dell'economia circolare quali:

- minor produzione dei rifiuti;
- riduzione delle emissioni in atmosfera;
- minor consumo energetico;
- riutilizzo e riciclaggio della materia;
- risparmio di costi.

Varie bio-risorse sono state identificate come idonee a sostituire parzialmente l'utilizzo del tradizionale legante bituminoso per lo sviluppo sostenibile di pavimentazioni flessibili. Tra molteplici tipologie identificate, i potenziali bio-leganti da impiegare sono:

- Leganti a base di oli vegetali;
- Leganti derivanti da scarti della lavorazione del legno;
- Leganti derivanti da micro-alghe;
- Leganti contenenti lignina;
- Leganti derivanti da olio di scarto di cucina;
- Leganti contenenti bio-oli derivanti dalla lavorazione del letame suino

I bio-leganti vengono impiegati come sostituto del bitume, sia totale che parziale nelle miscele di conglomerato bituminoso. La prestazione di ogni bio-legante dipende dalla fonte da cui deriva il materiale e il metodo di estrazione e produzione dello stesso. A seconda della percentuale di origine biologica aggiunta al legante convenzionale, si può parlare di leganti alternativi diretti (sostituzione al 100%), estensore del bitume (dal 25 % al 75% di sostituzione del bitume) modificatore del bitume (minore del 10% di sostituzione del bitume). [1]

A causa della diversa provenienza di questi materiali, il bio-legante avrà caratteristiche differenti, che si ripercuoteranno sulle prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi. Tendenzialmente, la tipologia più diffusa si presenta in forma oleosa. I cosiddetti " bio-oli" hanno un effetto flussante sui bitumi, e provocano tendenzialmente una diminuzione della loro viscosità e consistenza. Al contrario, i bio-leganti sotto forma di polvere, come la lignina, aggiunti al bitume comportano, in generale, un aumento della consistenza. Tali effetti sono tanto più accentuati quanto maggiore è il dosaggio del bio-materiale.

A differenza dei bitumi tradizionali, l'impiego dei bio-leganti consente di soddisfare i principi esposti precedentemente; inoltre, l'uso efficiente di questi biomateriali, prodotti di scarto nella produzione di pavimentazioni stradali, non solo ridurrà l'inquinamento ambientale, ma ridurrà anche la dipendenza dal bitume di petrolio e migliorerà l'efficienza nell'industria del legno facendo uso di sottoprodotti di scarto indesiderati che andrebbero alternativamente smaltiti in apposite discariche, producendo un ulteriore impatto ambientale.

Nel presente lavoro di Tesi si analizzeranno le prestazioni meccaniche offerte da bio-miscele prodotte impiegando un bio-legante ottenuto a partire da un bitume tradizionale parzialmente sostituito dalla lignina.

2.2 La lignina come bio-legante

La lignina è il secondo biopolimero naturale più diffuso sulla terra, è uno dei costituenti principali dei vegetali ed esplica la funzione legante, impartendo durezza e durabilità alla pianta [2]. Essendo derivata dagli scarti generati dall'industria della carta e del legno si può disporre di grandi quantitativi in tutti i continenti (si stima che annualmente vengano prodotte più di 50 milioni di tonnellate di lignina solo dall'industria cartaria), ma se le sue caratteristiche sono strettamente dipendenti dalla materia prima e dai processi produttivi adottati.
Per ottenerla vengono eseguite una serie di lavorazioni come:

- Operazioni di pretrattamento, in cui la biomassa lignocellulosica viene compressa con vapore e successivamente riportata rapidamente alla pressione atmosferica, con conseguente frammentazione del materiale. È un trattamento a basso consumo energetico in quanto viene utilizzata unicamente l'acqua come solvente;
- Operazioni di separazione (*pulping*), in cui si rompono i legami tra cellulosa, emicellulosa e lignina;
- Estrazione acquosa, in cui si recupera l'emicellulosa idrosolubile, che viene successivamente idrolizzata in altri componenti minori;
- Estrazione organica, che consente di recuperare un liquido nero contenente lignina ad alte concentrazioni, successivamente seccato, per ottenere lignina in polvere;
- Recupero della cellulosa, che consente di recuperare un residuo a base di pasta di cellulosa utile nell'industria di carta e fibre.

Ad oggi, l'applicazione tradizionale della lignina è per lo più limitata al carburante, mentre solo una piccola quantità di lignina è stata utilizzata come bio-prodotto.
Tuttavia, tra le varie fonti bio precedentemente citate, la lignina è potenzialmente un'ottima soluzione nel settore delle pavimentazioni stradali. Infatti, essendo un composto idrocarburico (costituito principalmente da carbonio, idrogeno e ossigeno), presenta una composizione simile a quella del bitume tanto da manifestarne una buona compatibilità.

Diversi studi dimostrano che una parziale sostituzione del bitume con lignina potrebbe addirittura incrementare determinate performances del legante e di conseguenza delle proprietà meccaniche del conglomerato bituminoso. Infatti, essendo un bio-polimero, può essere introdotto per sostituire altri polimeri aromatici industriali ottenendo al tempo stesso un duplice vantaggio in termini ambientali ed economici. Dare nuova vita ad un sottoprodotto industriale, infatti, consente non solo di evitare il suo smaltimento in apposite discariche, ma anche di evitare l'impiego di nuova materia prima, con un conseguente risparmio in termini economici e di emissioni.
Dal punto di vista chimico, abbondanti anelli aromatici sono legati con catene alchiliche, dando origine a complesse macromolecole molto ramificate e amorfe con peso molecolare medio compreso tra 1000 e 20000 g/mol, a seconda del processo produttivo (Figura 2.1).
Durante il processo della miscelazione della lignina nel bitume, il biopolimero provoca l'assorbimento della fase liquida del bitume nell'area di interazione bitume-lignina che forma un sistema di lavoro tale da modificare il comportamento viscoelastico dei leganti bituminosi. Questo fenomeno è dovuto grazie alla formazione di legami tridimensionali nella matrice bituminosa, dando vita a un aumento delle proprietà reologiche del bitume, ovvero alle elevate temperature gioca un ruolo importante nell'invecchiamento del bitume stesso.

Nonostante diversi studi hanno dimostrato una possibile funzione antiossidante della lignina, questa caratteristica può essere veritiera solo se la quantità di lignina da sostituire al bitume è in quantità limitata. La lignina offre anche altri vantaggi, si verifica un importante impatto sul bio-legante alle alte temperature, con un aumento della resistenza alle deformazioni permanenti, ma anche alle basse temperature, con un aumento della resistenza alla rottura. Tali miglioramenti, però, sono fortemente dipendenti dalla composizione eterogenea e complessa della lignina che fa risultare di difficile predizione il comportamento della miscela alle basse e alte temperature.

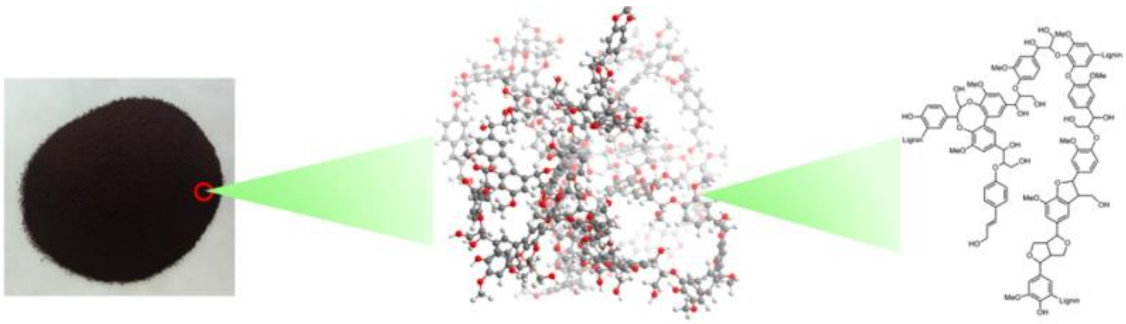


Figura 2.1. Composizione chimica della lignina

In generale si può affermare che la lignina è un prodotto:

- Rinnovabile;
- Versatile;
- Disponibile in grandi volumi;
- Economicamente vantaggioso, in quando è uno scarto dell'industria cartaria;
- Possessore di un alto contenuto energetico, a causa della presenza di anelli aromatici;
- Facilmente modificabile da un punto di vista chimico, per ottenere prodotti ad alto valore aggiunto come, ad esempio, sostitutore parziale del bitume;
- Presente in percentuali importanti in molte specie vegetali, come la corteccia del legno, oppure la canapa, la paglia, il lino, ecc.

2.3 Impiego della lignina in letteratura

Le soluzioni "green" nel campo delle pavimentazioni stradali hanno portato numerosi ricercatori a concentrarsi sullo studio di alcuni bio-leganti, ovvero leganti bituminosi che vengono sottoposti alla sostituzione totale o parziale con biomateriali, come ad esempio la lignina. Grazie a queste ricerche è stato possibile valutare alcuni comportamenti ed effetti che la lignina ha sui conglomerati bituminosi.

Di seguito si riportano alcune osservazioni riguardanti studi presenti in letteratura sull'utilizzo di lignina come bio-legante. Generalmente vengono ottenuti andando a sostituire diversi contenuti di lignina al bitume, riferiti come % in peso, e ne vengono studiate le proprietà
reologiche

Chi et al. [3] hanno valutato la fattibilità dell'utilizzo della lignina per migliorare le prestazioni del bitume. A tale scopo, sono state selezionate lignine derivanti da trucioli di legno di pioppo (codificato come KL) e residui di gambo di mais (codificato come CL) per preparare il legante bituminoso modificato. Le proprietà del bitume modificato con lignina sono state studiate attraverso test reologici, meccanici e chimici. I risultati hanno mostrato un effetto positivo della lignina sulle prestazioni ad alta e bassa temperatura rispetto al legante bituminoso, perché il biopolimero è in grado di ridurre la rigidezza del legante. La modifica della lignina ha migliorato la viscosità, la rigidità, il punto di rammollimento, la resistenza all'ormaiamento e il recupero elastico del legante vergine, la deformazione permanente e la resistenza all'invecchiamento. Tuttavia, è stato riscontrato che la lignina deteriora la durata a fatica e la lavorabilità del legante. L'applicazione di questo biomateriale ha migliorato la stabilità Marshall, la resistenza all'umidità

e ridotto il peso molecolare del conglomerato bituminoso, osservato dai risultati del test della cromatografia a permeazione a gel.

Pérez, et al. [4] hanno studiato il comportamento del bio-legante con lignina applicato nella produzione delle miscele in conglomerato bituminoso. Nel caso in questione la sostituzione avviene nelle percentuali del 5, 10, 20, 40% in peso di bitume e sono state indagate la resistenza all'umidità e alla suscettibilità termica e la deformazione permanente. La prima fase di studio si è focalizzata sulla miscelazione della lignina con il bitume. Tale operazione è risultata complicata per le percentuali più elevate (40%) in quanto si è formata una quantità di schiuma che non ha reso possibile concludere l'operazione. Pertanto, percentuali elevate di lignina (40-60%) risultano fortemente sconsigliate, visto che oltre al consistente aumento volumetrico in fase di miscelazione, possono insorgere anche fenomeni di cristallizzazione delle particelle visibili ad occhio nudo. Una volta ottenute le bio-miscele contenenti lignina, queste hanno mostrato una migliore resistenza ai danni causati dall'umidità rispetto alla miscela di riferimento, ovvero quella utilizzando un bitume di riferimento tradizionale. Le miscele realizzate con il 20% di lignina presentano deformazioni permanenti inferiori rispetto alla miscela di riferimento. Infine, una percentuale di sostituzione del 20% circa è quella che risulta più ottimale anche in termini di sostenibilità ambientale ed economica.

Eyram et al. [5]

hanno condotto uno studio analizzando gli effetti della lignina di scarto sulle proprietà dei leganti bituminosi (caratterizzazione reologica, morfologica, attitudine alla decomposizione, comportamento alle basse e alle temperature, resistenza a fatica, deformazione, adesione all'aggregato in presenza di acqua e stabilità allo stoccaggio). I risultati mostrano che aumentando il contenuto di lignina, aumenta la coesione e l'irrigidimento del legante. L'aggiunta del 10 % di lignina ha avuto un'influenza trascurabile sulle caratteristiche di lavorabilità e compattazione della miscela in conglomerato bituminoso. Le prestazioni del legante contenente lignina a bassa e alta temperatura aumentano con l'aumentare del contenuto di lignina. I risultati Rolling Bottle Test hanno rilevato che l'aggiunta di fibre di lignina al bitume hanno aumentato la resistenza all'ormaiamento del legante, mentre i risultati della scansione di ampiezza lineare (LAS) hanno mostrato una diminuzione della resistenza alla fatica.

Arafat et al. [2] hanno studiato le caratteristiche del bio-legante in condizioni non invecchiate e invecchiate, impiegando lignina in polvere. In particolare, è stata sostituita solo una piccola parte (il massimo dosaggio è pari al 6%) del bitume di base con lignina proveniente da lavorazioni differenti: una lignina Kraft derivata dalla lavorazione del legno tenero (*black liquor*) ed una lignina prodotta dalle bucce di riso. Si è verificato che la lignina proveniente dal *black liquor* è

meno suscettibile all'invecchiamento a breve termine rispetto alle altre lignine in esame e rispetto al bitume di riferimento, soprattutto all'aumentare del contenuto di lignina. Invece, per quanto riguarda la lignina proveniente dalla lavorazione delle bucce di riso, ha restituito un indice di invecchiamento simile a quello del bitume di base; quindi, ha mostrato prestazioni di invecchiamento soddisfacenti a breve termine.
Nel complesso, la lignina proveniente dal *black liquor* e quella proveniente dalla lavorazione delle bucce di riso, hanno restituito una maggior resistenza in termini di invecchiamento a lungo termine rispetto alla miscela di riferimento.
Dagli studi di Yu Zhang et al. [6], emerge la fattibilità dell'uso della lignina nel legante per conglomerati bituminosi sia come sostituzione parziale che come modificatore. L' effetto del conglomerato bituminoso con polvere di lignina sul miglioramento è stato più evidente. Il legante per conglomerato bituminoso modificato con lignina ha migliorato le prestazioni adesive tra aggregati e legante, il che è particolarmente utile per resistere alle fessurazioni termiche. Le fibre di lignina ha anche avuto un effetto rinforzante sulla microstruttura della miscela di conglomerato bituminoso, che ritarda la fessurazione. La suscettibilità all'umidità della miscela di conglomerato bituminoso è principalmente influenzata dalle caratteristiche degli aggregati minerali, dai comportamenti di interazione bitume-aggregato e dai vuoti d'aria della miscela di conglomerato bituminoso. In generale, è più facile che l'umidità si infiltri nella superficie dell'aggregato rispetto all'aggregato al legante per conglomerato bituminoso. Ciò ridurrà l'adesione tra bitume e aggregato e porterà a danni causati dall'umidità sulla fase di stesura del conglomerato bituminoso.

Come si osserva dai vari studi presenti in letteratura sull'impiego della lignina per la produzione di bio-leganti, è possibile affermare che essi restituiscono prestazioni a volte migliori, o comunque non eccessivamente penalizzanti rispetto ai leganti tradizionali impiegati oggigiorno nelle pavimentazioni flessibili. Inoltre, presentano numerosi vantaggi mitigando i problemi ambientali ed economici in quanto contribuiscono alla riduzione dei rifiuti e alla diminuzione del consumo di bitume, materiale non rinnovabile ed esauribile nell'arco di qualche decennio.

Il presente lavoro di Tesi si occupa dell'impiego della lignina nei conglomerati bituminosi, effettuando una caratterizzazione meccanica in termini di valutazione della resistenza a frattura e termo-suscettibilità di conglomerati bituminosi prodotti con bio-leganti contenenti lignina. Tale studio risulta innovativo rispetto a quanto è possibile consultare in letteratura in quanto la lignina viene dosata fino al 30% in peso di bitume, quantitativo attualmente considerevole rispetto alle percentuali comunemente impiegate.

Capitolo 3
Indagine sperimentale

3.1 Inquadramento del progetto

La presente Tesi di Laurea si concentra sullo studio di miscele in conglomerato bituminoso ottenute con l'impiego di bio-leganti contenenti lignina, che sono state messe a confronto con una miscela in conglomerato bituminoso di riferimento. In questo modo, è possibile allo stesso tempo promuovere una maggior sostenibilità ambientale ed un risparmio economico, passando da un concetto di economia lineare ad un'economia circolare.

Infatti, essendo il bitume derivante dalla raffinazione del petrolio, che è una risorsa non rinnovabile, negli ultimi anni si sta concretizzando la necessità di sostituire il bitume totalmente o parzialmente con materiali rinnovabili, derivanti generalmente da prodotti di scarto delle industrie o da rifiuti quotidiani.

Di seguito verranno descritti nello specifico tutti i materiali, le apparecchiature utilizzate e i metodi di prova adoperati in questa sperimentazione, ricordando che gli obiettivi da soddisfare sono i seguenti:

1. Valutazione della suscettibilità termica;
2. Valutazione della suscettibilità all'invecchiamento;
3. Valutazione della resistenza a frattura a basse temperature

Per perseguire tale scopo, la sperimentazione ha previsto l'esecuzione di:

1. prove ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) per la valutazione della rigidezza a diverse temperature e due gradi di invecchiamento (unaged/aged)
2. Prove SCB (Semi-Circular Bending Test) (unaged/aged).

3.2 Materiali

Nel presente studio sperimentale sono stati analizzati **tre** diverse tipologie di bitume, di cui la classe 50/70 rappresenta quella di riferimento. Per entrambe le classi rimanenti una percentuale di legante è stata sostituita una frazione di lignina, al fine di massimizzare l'impiego di essa per ottenere prestazioni confrontabili con il bitume di riferimento.

3.2.1 Bitumi

I leganti bituminosi impiegati sono stati forniti da diversi produttori, in particolare il bitume di riferimento è di origine italiana, mentre gli altri due sono di origine svedese.

Secondo la classificazione dei bitumi (UNI EN 12591 – 2009) i leganti vengono distinti in diverse classi che tengono in considerazione il loro grado di penetrazione, differenziandosi in bitumi più duri, impiegati in climi caldi, da quelli più morbidi, utilizzati nei climi più freddi.

Le classi di bitume oggetto di tesi, sono le seguenti:

1. B50/70, rappresentante il bitume tradizionale di riferimento;
2. B70/100;
3. B100/150.

Le loro proprietà, inerenti al grado di penetrazione, punto di rammollimento e viscosità dinamica, sono schematizzate nella Tabella 3.1:

Tabella 3.1. Proprietà dei bitumi tradizionali

Bitume	Penetrazione [dmm]	Pt. rammollimento [°C]	Viscosità(160°C) [Pa*s]
50/70	50	51,5	0,116
70/100	88	46,5	0,117
100/150	127	41,2	0,181

3.2.2 Lignina

Le lignine utilizzate hanno diversa origine e provenienza e sono state definite come segue:

1. Lignina S (di origine svedese);
2. Lignina B (di origine balcanica);

In Tabella 3.2 sono riassunte le loro principali caratteristiche fisiche – chimiche presenti nelle schede tecniche.

Tabella 3.2. Proprietà chimico-fisiche della lignina impiegata

Lignina	Origine	Provenienza	Colore	Odore	Umidità [%]	Densità [g/cm³]	Dimensioni granuli
S	Svezia	Trattamenti termochimici e enzimatici del legno	Marrone scuro da umida, marrone chiaro da asciutta	Debole da umida, pungente quando viene miscelata	50-60	N/D	da micron a cm
B	Balcani	N/D	Marrone scuro con elementi lignei color crema chiaro	Debole da umida, pungente quando viene miscelata	N/D	1,25-1,45	da micron a cm

Dalla Figura 3.1 è possibile osservare come le lignine sono state sminuzzate manualmente, fino ad ottenere piccoli agglomerati di dimensioni inferiori a mezzo cm, successivamente essiccate in forno a 105°C per garantire l'evaporazione del contenuto d'acqua, e infine miscelate insieme al legante bituminoso.

Figura 3.1. Le lignine utilizzate per le miscelazioni

3.2.3 Aggregati

Gli aggregati impiegati per il confezionamento dei provini sono:

- aggregati naturali di origine calcarea in diverse pezzature;
- il conglomerato bituminoso di recupero (fresato);
- il filler.

Aggregati naturali

La norma UNI-EN 13043 definisce aggregato il materiale granulare utilizzato nelle costruzioni e lo suddivide in "naturale", "industriale" e "riciclato", e in frazioni "grosso", "fine" e "filler".

Secondo la norma UNI EN 13108–1:

- gli elementi litoidi non dovranno mai avere forma appiattita, allungata o lenticolare;
- La miscela degli inerti è costituita dall'insieme degli aggregati grossi e dagli aggregati fini ed eventuali additivi (filler);
- Ai fini dell'impiego è obbligatoria l'attestazione di conformità (CE) da parte del produttore relativamente (almeno) ai requisiti richiesti.

I materiali inerti utilizzati presentano le seguenti classi granulometriche:

- Aggregato grosso nella frazione 10/16;
- Pietrisco nella frazione 6/12;
- Sabbia nella frazione 0/4;
- Filler.

Conglomerato bituminoso di recupero (RAP)

Per la produzione di miscele in conglomerato bituminoso, è stato impiegato anche il conglomerato bituminoso di recupero (detto fresato o RAP), al fine di massimizzare l'utilizzo di materiali riciclati per la sostenibilità ambientale e per motivi economici. Nello specifico, si tratta di fresato derivante da pavimentazioni legate non modificate con aggiunte polimeriche. Trattandosi di uno strato di binder confezionato con bitumi tradizionali o con bio-binder, il Capitolato ANAS di riferimento prevede un quantitativo massimo di impiego pari al 15%.

3.2.4 Curva granulometrica di progetto

La curva granulometrica adottata per la composizione delle miscele in conglomerato bituminoso è stata ottimizzata durante un precedente lavoro di tesi, a partire dalle specifiche indicate nel Capitolato Speciale d'Appalto ANAS, che fornisce un fuso di riferimento per lo strato di binder. Sulla base delle classi granulometriche precedentemente illustrate, è stata ricostruita la curva di centro fuso (Figura 3.2) che presenta le combinazioni di classi granulometriche indicate in Tabella 3:

Tabella 3.3. Combinazione delle classi granulometriche per la determinazione della curva granulometrica

Setacci	CA1 10-16	CA2 6-12	Sabbia 0-4	Filler	RAP (attuale)	**Progetto**
mm	**20,0**	**22,0**	**37,0**	**6,0**	**15,0**	%
20	100,0	100	100,0	100	100	100,0
16	85,0	100,0	100,0	100,0	98,7	96,8
12,5	15,0	99,9	100,0	100,0	92,1	81,8
8	3,0	43,9	100,0	100,0	72,1	64,1
4	0,0	1,3	94,3	100,0	47,5	48,3
2	0,0	0,9	62,1	100,0	32,3	34,0
0,5	0,0	0,6	18,2	98,4	16,6	15,3
0,25	0,0	0,5	8,4	95,0	13,5	10,9
0,063	0,0	0,2	1,2	77,3	9,5	6,6

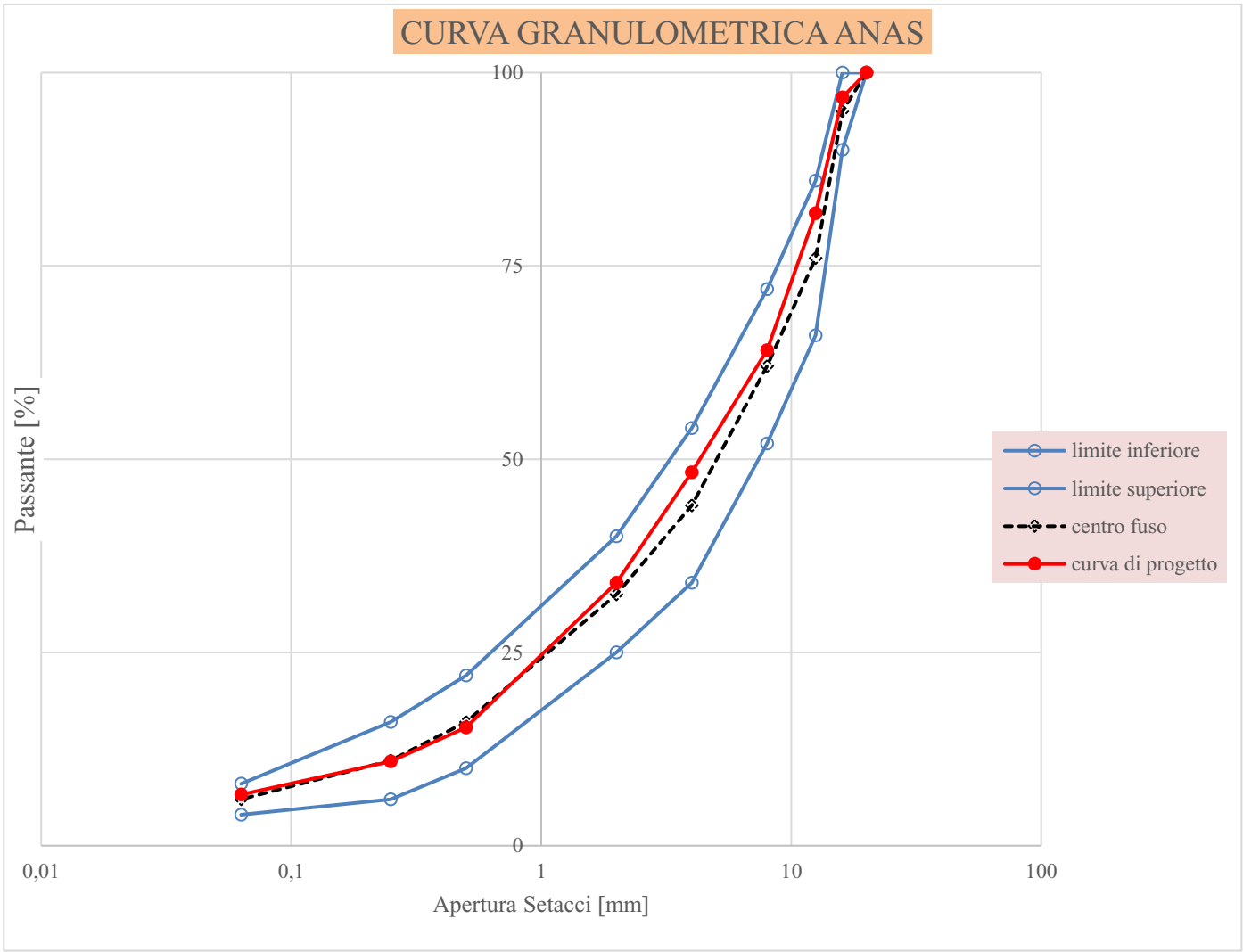


Figura 3.2. Curva granulometrica di progetto

La curva granulometrica ottimizzata è stata denominata "Curva di progetto". Durante lo studio del mix-design, oltre all'ottimizzazione della curva granulometrica è stato ottimizzato anche il contenuto di legante in modo da rispettare i limiti del Capitolato ANAS inerente al tenore dei vuoti. In particolare, per la miscela di riferimento è stato adottato il 5,4% in peso di bitume, mentre il 6,4% di legante per le miscele contenenti lignina.

In particolare, per ogni contenuto di legante indagato, lo 0,6% di bitume è l'apporto portato dal RAP. Quindi, nella miscela di riferimento, il contenuto di bitume può essere suddiviso come segue:

$$5{,}4\% \begin{bmatrix} 0{,}6\%\ RAP \\ 4{,}8\%\ bitume\ aggiunto \end{bmatrix}$$

Mentre nelle miscele contenenti lignina, il legante detratto dal contenuto apportato dal RAP, rappresenta il bitume aggiunto di cui il 30% è costituito dalla lignina stessa. Dunque, il legante per le miscele 70/100_S e 100/150_B pari al 6,4% in peso, è suddiviso come segue:

$$6{,}4\% \begin{cases} 0{,}6\%\ RAP \\ 5{,}8\%\ bitume\ aggiunto \begin{cases} 30\%\ Lignina \\ bitume\ rimanente \end{cases} \end{cases}$$

Pertanto, tali miscele contengono il 4,65% di bitume totale ottenuto dalla somma del bitume proveniente dal RAP e quello aggiunto. Scegliendo un contenuto di legante pari al 6,4% consente di ottenere un risparmio di bitume di circa il 15% rispetto a quello assunto per la miscela di riferimento.

3.3 Apparecchiature e metodi

Come già precedentemente precisato, questo lavoro di tesi ha testato provini già confezionati secondo le composizioni illustrate nel paragrafo precedente. Questi sono frutto di un precedente lavoro di tesi, volto allo studio del mix design delle miscele in oggetto e ad una prima campagna di caratterizzazione meccanica. Si illustrano ora le apparecchiature ed i metodi adottati per la caratterizzazione meccanica oggetto della presente ricerca.

3.3.1 ITSM -Indirect Tensile Stifness Modulus

La misura del modulo di rigidezza avviene secondo le direttive della UNI EN 12697-26 per mezzo della prova di modulo a trazione indiretta ITSM (Indirect Tensile Stifness Modulus). Il modulo di rigidezza si definisce come la capacità di una miscela di deformarsi se sottoposto all'applicazione di un carico. Pertanto, nell'ambito delle pavimentazioni stradali, rappresenta la capacità di diffondere le deformazioni ed assorbire i carichi veicolari in funzione del legame presente tra gli strati e delle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti.

Metodo di prova

L'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester) consente la determinazione del modulo di rigidezza mediante una prova a trazione indiretta. Essa consente di applicare un carico di compressione in una direzione e di misurare la deformazione tramite trasduttori nella direzione ruotata di 90° rispetto a quella di applicazione del carico. Tale prova si effettua in condizioni di controllo di spostamento, ovvero si applica il carico necessario a produrre una deformazione orizzontale massima pari a $5 \cdot 10^{-6}$ mm/min. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di 90°±2°). I parametri caratteristici dell'onda di carico P sono:

1. Il carico di picco (peak load), corrispondente a una deformazione orizzontale pari a 5 micrstrains;

2. pulse repetition period, il tempo che intercorre tra l'applicazione di due carichi successivi, pari a 1 secondo (0,25 secondi di durata del carico + 0,75 secondi di riposo);

3. rise time, tempo impiegato da un impulso a raggiungere il valore di picco, pari a 124 ± 1ms;

4. load area factor, il rapporto tra l'area sottesa alla curva fino al raggiungimento del peak load e il periodo tra il raise time e il peak load.

I parametri che possono influenzare la determinazione del modulo di trazione indiretta sono:

1. La temperatura, secondo cui il modulo decresce se viene aumentata, poichè il materiale tende a presentare un comportamento più duttile.
2. Rise time, (tempo di picco): a causa della natura viscoelastica del materiale, più l'applicazione del carico è veloce, più la risposta del provino sarà rigida e il modulo risulterà maggiore, in particolare il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo.
3. Deformazione orizzontale imposta: a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova, se troppo elevate possono produrre un comportamento non lineare.

Pertanto, il modulo di rigidezza ITSM si calcola con la seguente formulazione:

$$ITSM = \frac{P \cdot (0{,}273 + \nu)}{\Delta x \cdot t}$$

Dove:

P = carico applicato;

Δx = deformazione orizzontale massima;

t = spessore del provino;

ν = coefficiente di Poisson

Strumentazione NAT

Il NAT è posto all'interno di una camera climatica che permette il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di prova. La misurazione della temperatura all'interno della camera avviene tramite un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina.

Tale strumentazione prevede varie componenti, Figura 3.3, quali:

1. Una camera climatica, alla temperatura di prova (nel caso corrente le prove sono state eseguite a 10,20,30,40°C);

2. Un castelletto, entro il quale viene posizionato il provino grazie a dei morsetti in plastica morbida per il fissaggio dello stesso;
3. Due trasduttori, inseriti entro dei posizionatori in ottone ed una vite inferiore;
4. Un pistone, che impone lo sforzo assiale necessario a raggiungere la deformazione voluta;
5. Un computer di supporto con installato il relativo software.

Figura 3.3. Apparecchiatura NAT

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare in maniera automatica tutte le variabili in gioco: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova.

Tali grandezze vengono tarate durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria, che servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione. Le specifiche condizioni di prova rendono lecita l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo.

Il primo elemento che viene illustrato nel dettaglio (4) è la cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 kN a cui subito sotto è collegato il pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino. Tale cella di carico è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati.

Figura 3.4. Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

La misurazione della deformazione nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico avviene tramite dei trasduttori che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione ogni minimo spostamento. Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti illustrati in Figura 3.5. In tale illustrazione si possono notare

i trasduttori che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori , il telaio al cui interno va posto il provino da testare, i morsetti di fissaggio che collegano il provino al telaio, il canale che permette il centramento del provino, le barre che permettono di posizionare i trasduttori a metà del provino, le viti che tengono in posizioni tali barre ed infine la leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori.

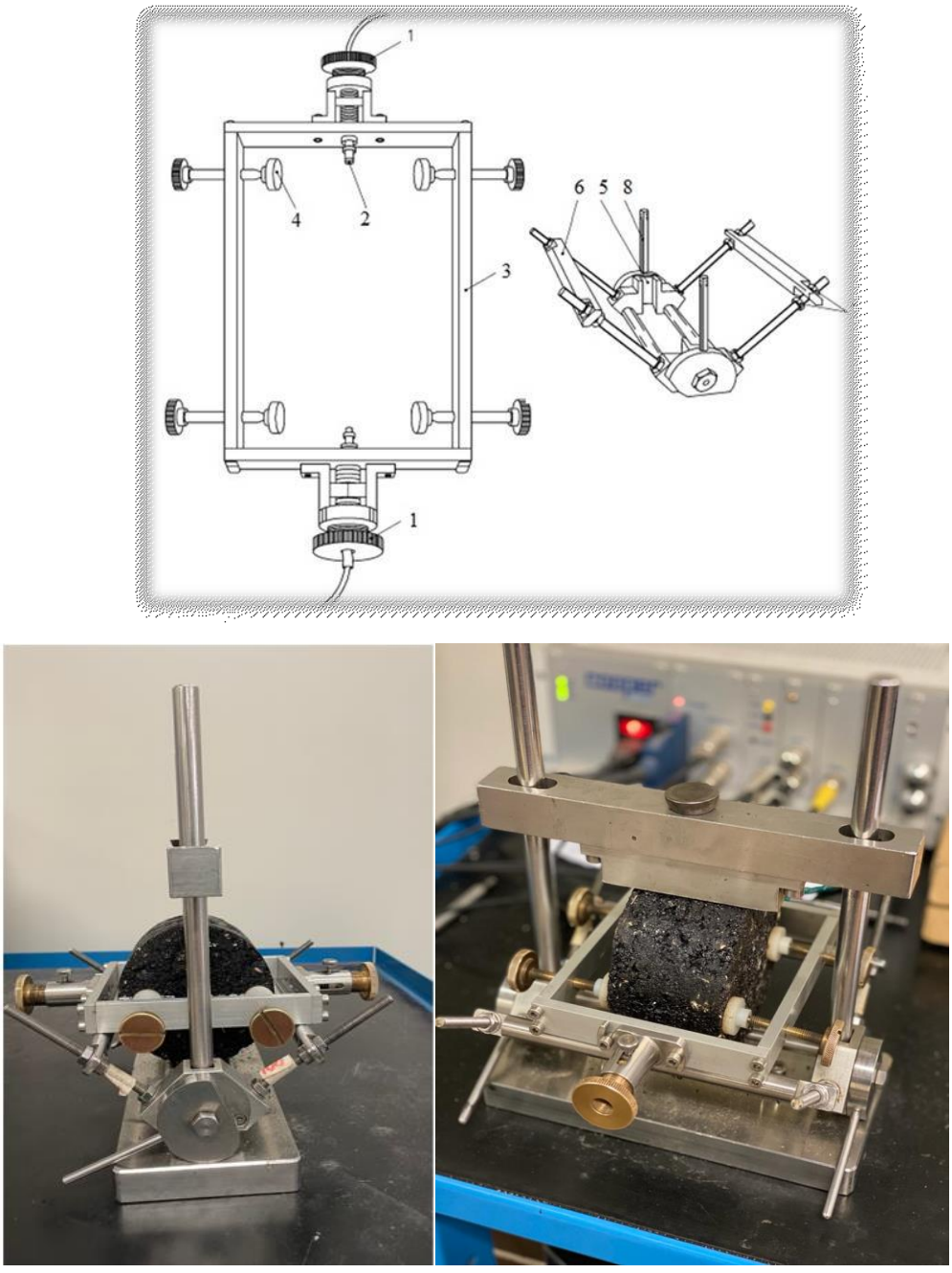


Figura 3.5. Componenti del castelletto

Lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il provino durante la prova di trazione indiretta è schematizzato nella Figura 3.6.

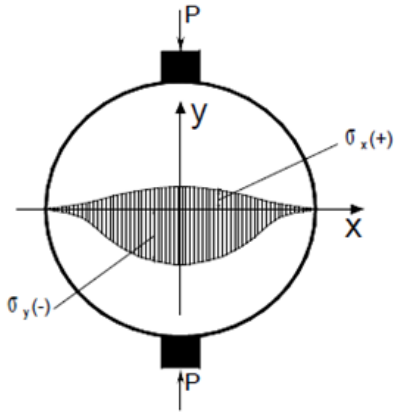


Figura 3.6. Stato tensionale

In corrispondenza del diametro orizzontale le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) ed y (compressione) sono date dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_{x,max} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \qquad \sigma_{x,media} = \frac{0{,}273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_{y,max} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \qquad \sigma_{y,media} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

dove:

- P: carico applicato;
- d: diametro del campione;
- t: spessore del campione.

La determinazione del modulo di rigidezza elastica in funzione di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale εx dell'elemento è:

$$\varepsilon_{x,media} = \frac{\sigma_{x,media}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,media}}{E}$$

dove:

- ν è il coefficiente di Poisson;
- E è il modulo elastico del materiale.

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

$$\Delta = \frac{0{,}273 \cdot P}{E \cdot t} + \nu \frac{P}{E \cdot t}$$

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale, come indicato nella seguente equazione:

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0{,}273 + \nu)$$

La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a 0,60±0,10, viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

$$E' = E[1 - 0{,}322(\log(E) - 1{,}82)(0{,}60 - k)]$$

dove:

- E' è il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- k è il rapporto tra le aree;
- E è il modulo di rigidezza in MPa.

Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ±4 ms ed una deformazione di 5,0±0,2 μm. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 5 μm.

Fasi operative

Prima di iniziare la prova è necessario che il provino sia condizionato in una camera climatica ad una temperatura prestabilita per un periodo di almeno quattro ore. Nella presente sperimentazione le temperature prestabilite per lo svolgimento della prova sono state quattro 10°C, 20°C, 30°C, 40°C. È possibile, a questo punto, iniziare la prova. Il primo passaggio è l'inserimento dei trasduttori nelle apposite prese del sistema computerizzato (LVDT-1 e LVDT-2) e l'apertura del programma "Calcheck Asphalt". All' interno di questo si inseriscono i corretti fattori di calibrazione dei due trasduttori (IT LVDT 1 e IT LVDT 2) e si controlla che il fattore di carico della cella sia corretto. Il secondo passaggio è quello dell'apertura del programma "Caltry-NU", tramite il quale è possibile controllare il funzionamento della cella di carico. A questo punto è possibile scegliere tra IT LVDT o PD LVDT nel caso della prova ITSM è necessario selezionare IT LVDT. È necessario, ora, procedere con il controllo del valore del carico di cella che deve essere compreso tra 0,010 e 0,020 KN nel caso della prova ITSM. Se il valore non risultasse corretto, sarebbe possibile modificarlo inserendo un cacciavite in un foro presente nel sistema di controllo. Sistemato il parametro del carico di cella, si può verificare l'effettivo funzionamento della cella di carico. Premendo su OFF che diventa ON, si attiva la cella e cliccando sulle frecce è possibile alzare o abbassare il pistone. Dopo aver verificato che il pistone si sia mosso, si clicca

su ON che torna OFF ed è possibile chiudere il programma. Una volta eseguiti questi primi passaggi, aventi la funzione di verificare il corretto funzionamento del macchinario, è possibile procedere con l'apertura del programma "ITSM-EN" per lo svolgimento della prova ITSM.
La schermata iniziale del software è quella indicata in 7, in cui vanno inseriti i dati riguardanti la data di effettuazione del test, l'addetto che lo esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. Queste informazioni sono utili solo alla stesura del rapporto di prova.

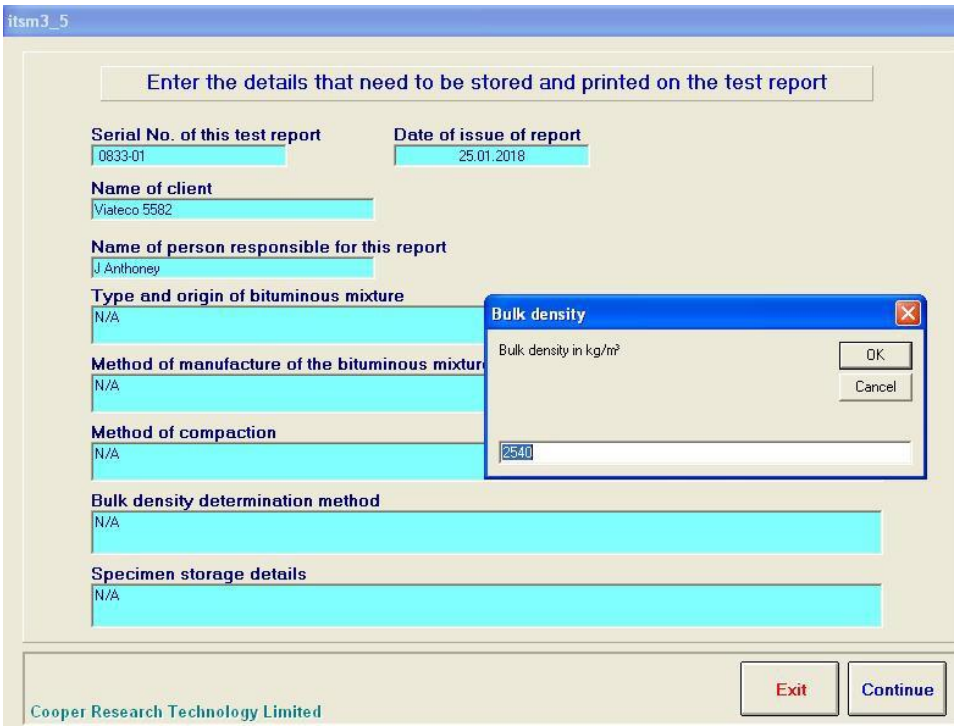


Figura 3.7. Schermata iniziale del software

Successivamente si procede all'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software.

Come si può notare dalla Figura 3.8 vanno inseriti i seguenti parametri:

1. Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
2. Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
3. Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
4. Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,35;
5. Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata (nel caso in esame 124ms);
6. Target horizontal Deformation [μm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino (nel caso in esame 5 μm);

7. Number of Conditioning Pulses: numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino la deformazione desiderata.

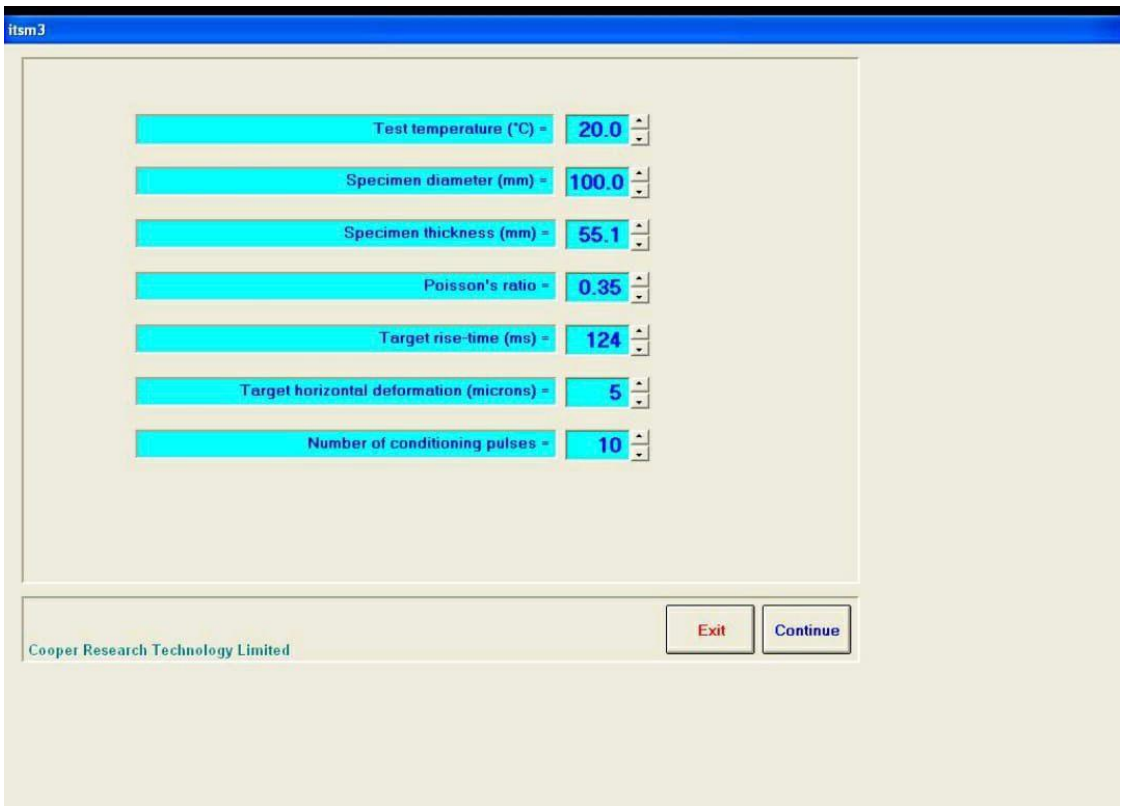


Figura 3.8. Figura schermata del software ITSM con dati input

Una volta inseriti tutti i parametri richiesti per svolgere la prova, è possibile procedere all'allestimento del provino con gli accessori già visti in precedenza. In primo luogo, è necessario prendere il castelletto e abbassare le due levette presenti lateralmente e appoggiarci sopra il porta-trasduttori. Si può, ora, inserire il provino all'interno del porta-trasduttori. Il provino è inserito in modo tale che il diametro da testare sia quello che si trova in posizione orizzontale. È fondamentale che il provino sia centrato non solo rispetto l'appoggio ma anche rispetto le due viti grandi, che sono quelle in cui verranno inseriti i due trasduttori. A questo punto si possono stringere le quattro viti laterali per fissare il provino. Infine, sulla testa del provino, viene poggiata la testa di carico, facendo attenzione che il provino sia centrato anche rispetto a quella; si possono ora sollevare le levette per far sì che il provino sia in equilibrio. Ora il provino è pronto per essere messo sotto la cella di carico, inserendolo in modo tale che il pistone sia al centro del provino. Si può procedere ora con l'inserimento dei trasduttori all'interno delle due viti: è fondamentale che i trasduttori siano interamente compressi, prima di fissarli. Successivamente viene visualizzata la schermata di Figura 3.9, utile al controllo dei trasduttori. Essi, infatti, vanno regolati finché le due freccette diventano rosse come in Figura 3.40, a quel punto significa che i trasduttori sono in

grado di misurare correttamente la deformazione. Se i trasduttori non fossero così regolati la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino, questo porta ad una errata applicazione del carico, in quanto si avrebbe un'auto-calibrazione errata e quindi il risultato del test verrebbe falsato.

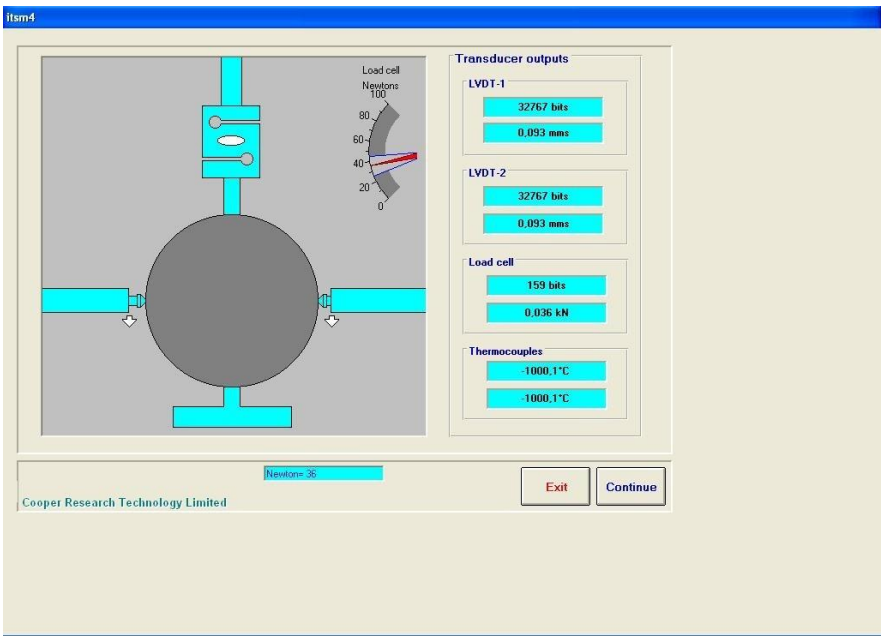


Figura 3.9. schermata prima della regolazione dei trasduttori

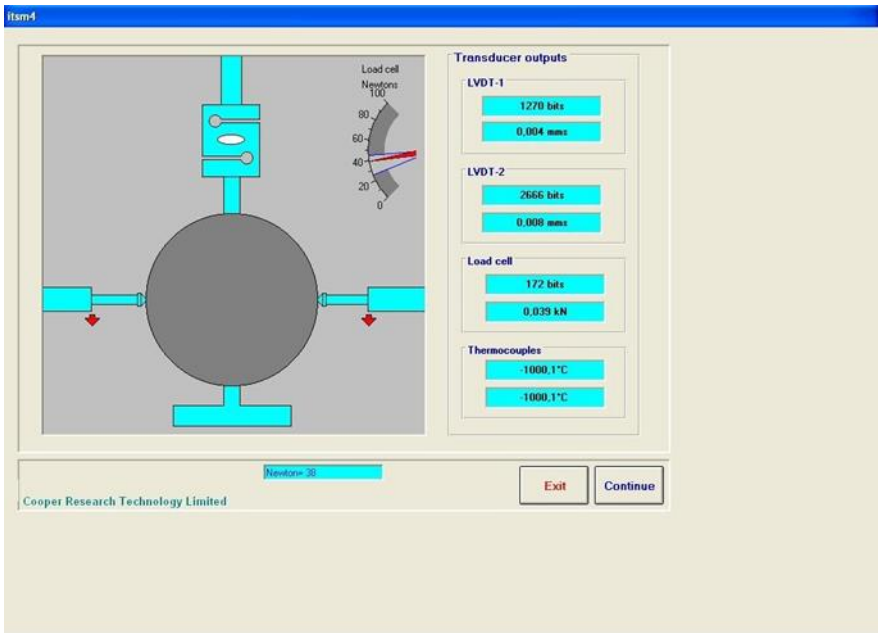


Figura 3.40. schermata dopo la regolazione dei trasduttori

La schermata successiva a cui si arriva tramite il clic sempre su "Continue" è quella di Figura 3.51. Una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di

carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico. Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante "Make Contact" infatti, il pistone si porta a contatto applicando sul provino una forza di pre-carico pari a circa 30 N.

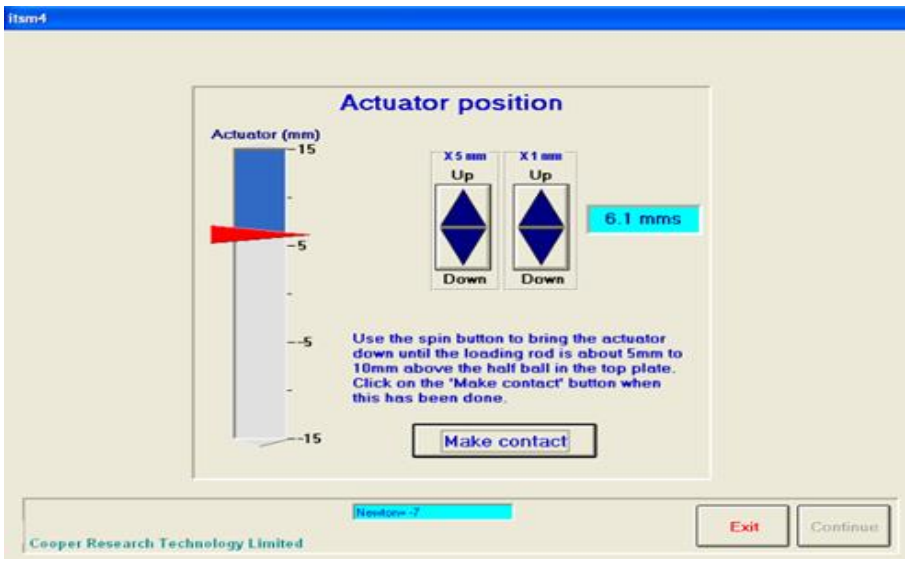


Figura 3.51. schermata con il comando "Make contact"

Una volta che i trasduttori sono in posizione corretta, va controllata la temperatura della camera climatica al cui interno è posizionata tutta l'apparecchiatura con il provino montato su essa. In particolare, tale temperatura non dovrà essere differente da quella di prova di un valore ± 0.5 °C. Una volta sicuri che anche la temperatura è corretta, Figura 3.62, si prosegue il test cliccando sul tasto "Continue" di Figura 3.73.

Figura 3.62. Controllo della temperature in camera climatica

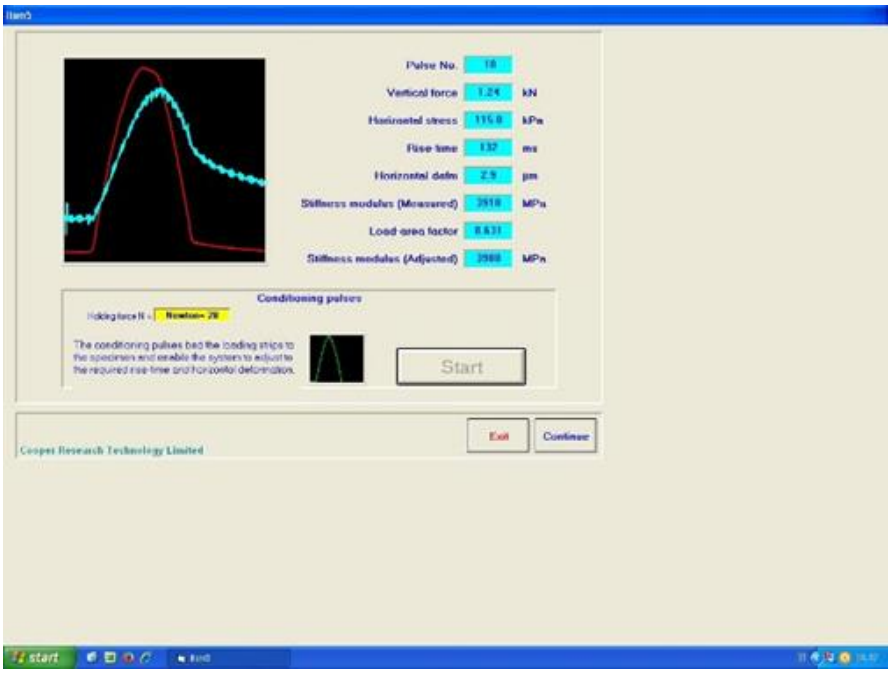


Figura 3.73. Schermata esecuzione prova

Precedentemente all'esecuzione della prova, la strumentazione avvierà una fase di condizionamento iniziale: attraverso un sistema di gestione ed acquisizione dati è possibile operare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Tali impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione. Per ottenere valori di rigidezza affidabili è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il

condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente. Pertanto, nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento.

Infine, si visualizzano i risultati come in figura Figura 3.84. In questa schermata finale si visualizzano i 5 impulsi di prova e ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro.

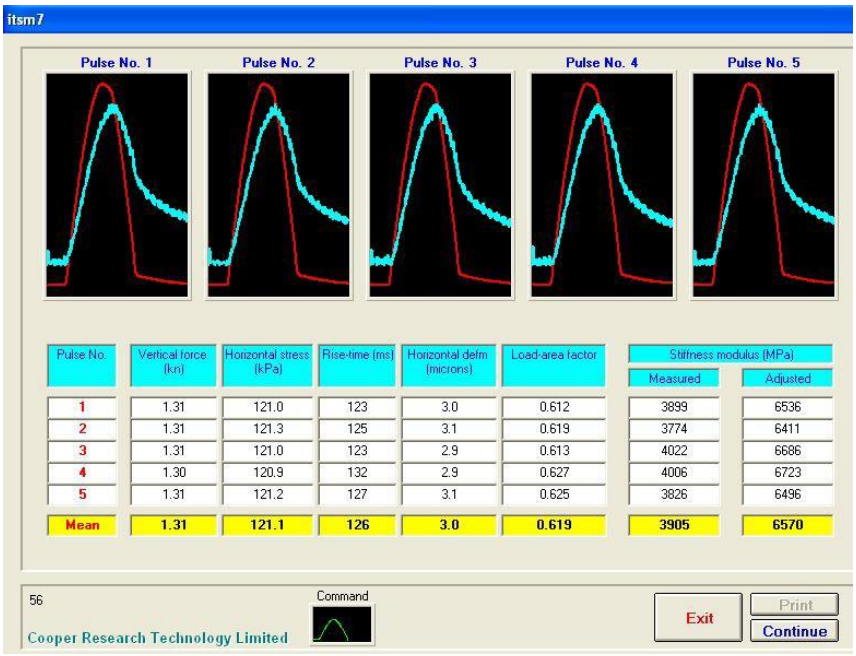


Figura 3.84. applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Terminata la prova è possibile rimuovere il provino e ruotarlo di 90° per poter eseguire la prova anche nel secondo diametro. Infatti, il software richiede che il provino venga ruotato di un angolo pari a (90° ± 10°). A questo, punto, si procede al test con i passaggi appena descritti. È, infatti, necessario determinare i valori dei moduli nei due diametri, così da poter ottenere e lavorare con il valore medio. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%.

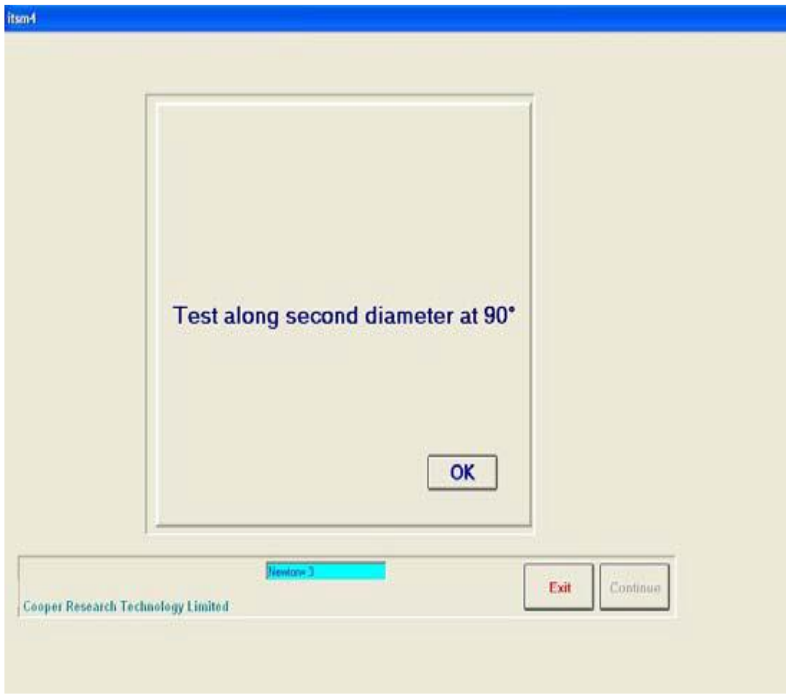


Figura 3.95. Schermata per la rotazione del provino di 90 °

3.3.2 Semi-circular Bending SCB

Il principio su cui si fonda la prova SCB, è il meccanismo di frattura elasto-plastica di conglomerati bituminosi, riprodotta in laboratorio mediante prova flessionale su tre punti, di cui quello centrale rappresenta il punto di applicazione del carico.

Durante il test, i provini semicircolari dotati di intaglio, vengono sottoposti ad una velocita di deformazione pari a 5mm/min; in continuo viene registrato, in funzione della deformazione del provino, il valore di carico che può sopportare, fino a completa fessurazione.

L'importanza di tale prova flessionale sta nella determinazione:

1. Del massimo carico che il provino può sopportare una volta innescata la fessurazione;
2. Dell'energia critica di rottura.

L'apparecchiatura di prova e dotata dei seguenti elementi (Figura 3.106):

1. Telaio principale;
2. Cella di carico, per la misura del carico con accuratezza del ± 0,2 kN;
3. Manometro di deformazione, in grado di misurare la deformazione con una precisione di ± 0,01 mm;
4. Cuscinetti a rulli, fissati ad un telaio principale, sui quali viene appoggiato il provino durante la prova;
5. Computer per acquisizione e controllo dati;
6. Striscia di carico, per trasmettere superiormente il carico al provino. La barra viene fissata mediante viti alla macchina di prova, e ai fini di una corretta esecuzione, deve ricadere a meta diametro del provino.

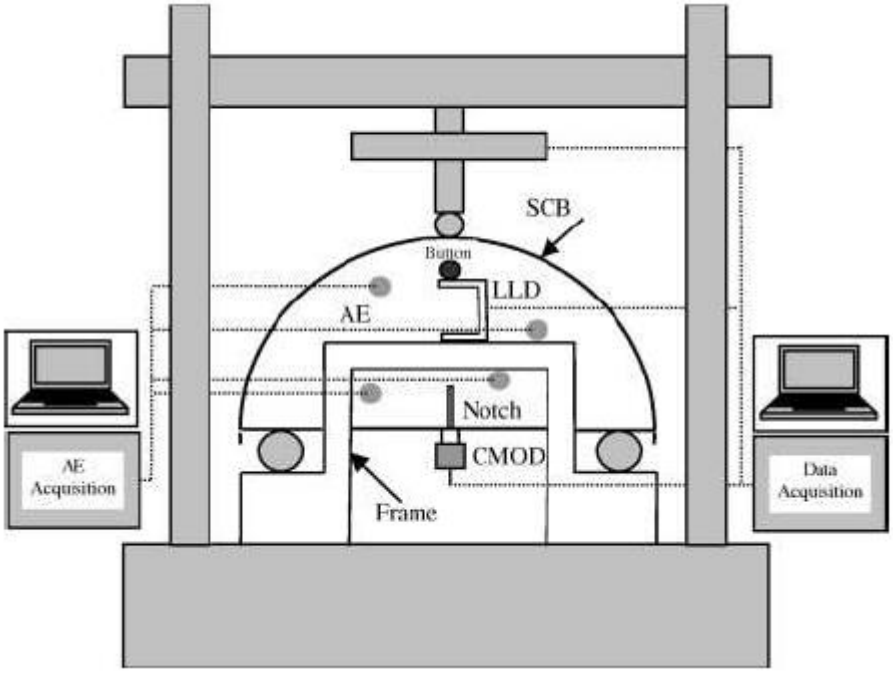


Figura 3.106. Schematizzazione dell'apparecchiatura di prova

I provini sottoposti alla prova vengono, ricavati da provini di Diametro 150 mm ed altezza 140mm confezionati tramite pressa Giratoria. Da tali provini (Figura 3.117) sono stati successivamente ricavati due provini cilindrici di altezza 50 mm (escludendo 20 mm all'estremità superiore e 20 mm all'estremità inferiore per escludere la porosità esterna data dalla compattazione mediante pressa giratoria). Infine, i due campioni sono stati ulteriormente tagliati a metà lungo un diametro, e gli è stato intagliato un notch di ampiezza 0.35±0.10 mm e profondità 10±1.0 mm come indicato dalla norma UNI EN 12697-44. Pertanto, ciascun provino presenta la classica configurazione a mezzaluna, con diametro 150 mm ed un intaglio al centro, altezza nel punto di massimo 75 mm e profondità 50 mm.

Figura 3.117. Provini della prova SCB

In Figura 3.128 vengono indicate le dimensioni adottate per i provini, che sono state rispettate in tale sede di sperimentazione.

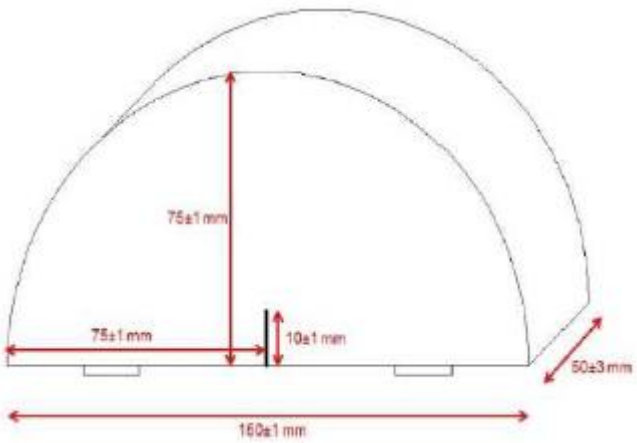


Figura 3.128. Dimensioni dei provini semicircolari

Si applicano delle placchette di alluminio, con il bitume, in corrispondenza dei punti di appoggio dei provini.

Figura 3.19. Provini dopo l'applicazione di placchette di alluminio con il bitume

E si procedere al condizionamento degli stessi per almeno 4 ore alla temperatura di 10 °C.

Allestita l'apparecchiatura di prova e avendo cura di disporre il provino sui cuscinetti a rulli, nel rispetto della configurazione riportata in Figura 3.130 si avvia il Software UTM2 per il controllo della prova e l'impostazione delle variabili:

1. Velocita di deformazione;
2. Dimensioni dei provini;
3. Arresto della prova.

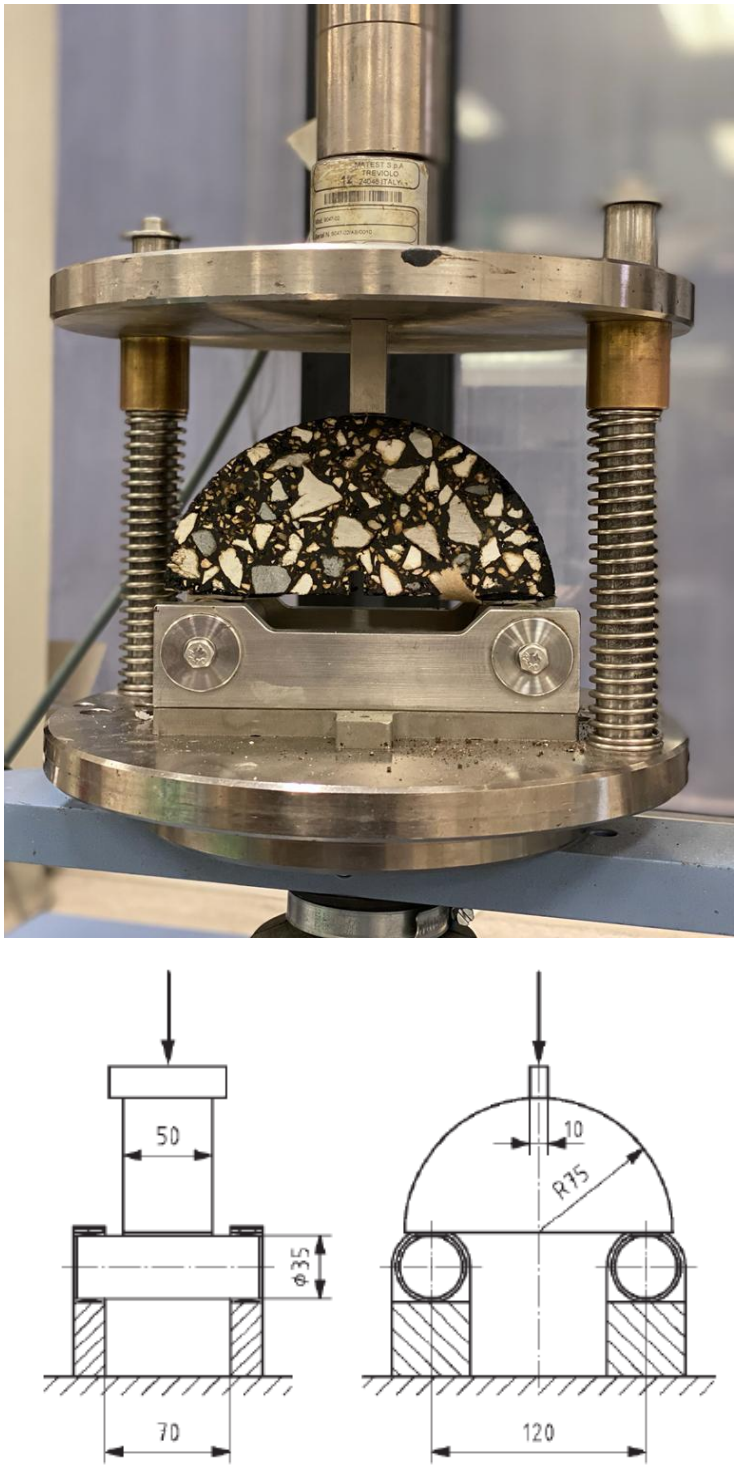


Figura 3.130. Posizionamento del provino sul telaio principale

Dal Software si avvia l'avanzamento a velocita costante del provino, ed una volta completato l'avvicinamento dello stesso alla testa di carico, viene registrata in continuo la forza opposta dal provino in funzione della deformazione. In particolare, viene restituita una curva, che presenta un picco in corrispondenza del carico massimo Fmax, parametro direttamente correlabile con l'attitudine del materiale alla fessurazione (Figura 3.141).

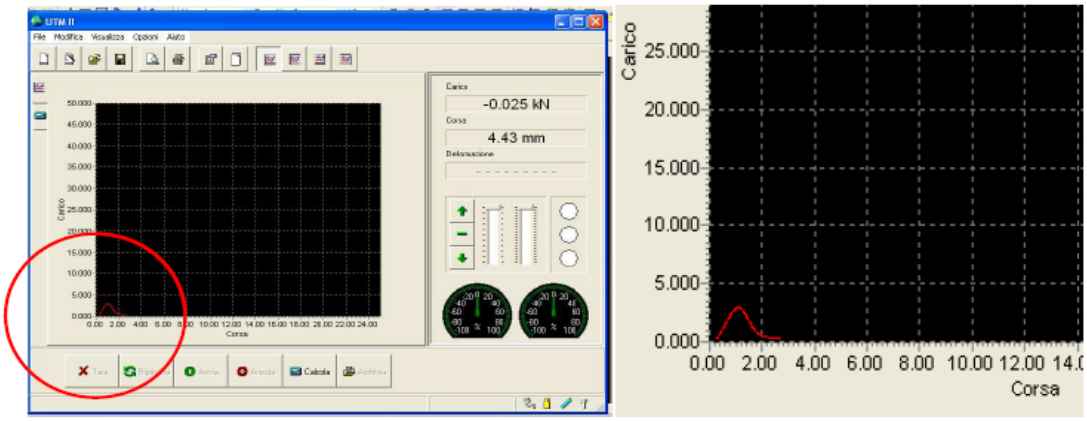


Figura 3.141. Curva di prova nel piano corsa-carico

La configurazione di prova è appositamente progettata affinché alla base del provino si sviluppino sforzi di trazione. Durante la prova, quindi, la fessura si innesca a partire dalla punta dell'intaglio, dove la concentrazione degli sforzi e maggiore, e tende a propagarsi in direzione del carico applicato.

La registrazione dei dati si interrompe quando il provino non oppone più alcuna resistenza: in particolare e stata impostata l'interruzione della prova al raggiungimento del 1 % del valore di carico massimo registrato. La prova si ritiene valida, qualora la fessura rispetti una particolare geometria nella sua propagazione (Figura 3.152): deve cioè ricadere, dall'asse dell'intaglio, ad una distanza pari al 10 % del diametro del provino. Al di fuori di quest'area si ritiene la prova non rappresentativa del comportamento del materiale; tale accorgimento viene assunto al fine di evitare un'eccessiva variabilità dei risultati, fortemente dipendente dalle dimensioni degli aggregati.

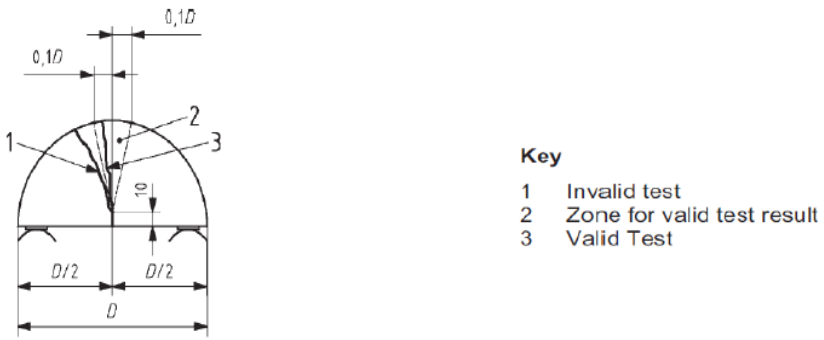


Figura 3.152. Schema di validità della prova

Per verificare in maniera rapida la validità della prova si utilizza una sagoma di plastica trasparente, sulla quale è disegnato il range massimo entro cui deve ricadere l'intaglio (Figura 3.163).

Figura 3.163. Verifica della fessura

Per un materiale elastico lineare, l'attitudine alla propagazione di una fessura può essere caratterizzato mediante un parametro K detto "Tenacità" o "Resistenza alla frattura", che rappresenta il valore critico di una funzione di intensità di sforzo, in corrispondenza della propagazione della cricca.

In particolare, il fattore K, si riferisce allo stato locale di sollecitazione intorno alla fessura, ed include in sé l'influenza della configurazione del provino, delle condizioni al contorno e del carico.

Rappresentando quindi la capacità del conglomerato a resistere alla fessurazione, risulta un parametro intrinseco del materiale e, in accordo con la normativa, può essere calcolato come di seguito:

$$K_{IC}(N/mm^{\frac{3}{2}}) = \sigma_{max} \cdot f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$$

Dove:

1. Wi = altezza di ciascun provino (mm)
2. ai =profondità dell'intaglio di ogni provino (mm)

3. σmax= sforzo massimo opposto alla fessurazione (N/mm2) valutata come:

$$\sigma_{max} = \frac{4{,}263 \cdot Fmax}{Di \cdot ti}$$

Dove:

1. Fmax carico di picco (N)
2. Di diametro del provino (mm)
3. ti spessore del provino (mm)

Per 9 < αi < 11 mm e 70 < Wi < 75 mm, quindi:

$$f\left(\frac{ai}{Wi}\right) = 5{,}956$$

Nota 1: per altri valori αi e Wi, può essere usata la seguente equazione per calcolare il fattore geometrico:

$$f\left(\frac{ai}{Wi}\right) = -4{,}9965 + 155{,}58\left(\frac{ai}{Wi}\right) - 799{,}94\left(\frac{ai}{Wi}\right)^2 + 2141{,}9\left(\frac{ai}{Wi}\right)^3 - 2709{,}1\left(\frac{ai}{Wi}\right)^4 + 1398{,}6\left(\frac{ai}{Wi}\right)^5$$

L' accuratezza dei valori k, è 0,1 $N/mm^{1,5}$

Nel corso della sperimentazione, oltre alle grandezze richieste dalla normativa, sono state calcolate altre grandezze legate all'energia dissipata dal materiale durante la prova.

Si definisce Energia di Frattura Epeak il lavoro, per unità di superficie, svolto sul materiale per incrementare la superficie di frattura. Tale parametro può essere calcolato come il rapporto tra il lavoro svolto per rompere il materiale (area sottesa dalla curva forza-spostamento) e la superficie del provino in cui avviene la propagazione della frattura, detta "ligament area" (Figura 3.174):

$$G = \frac{\int Fds}{t * (W - a)} (Kj/m^2)$$

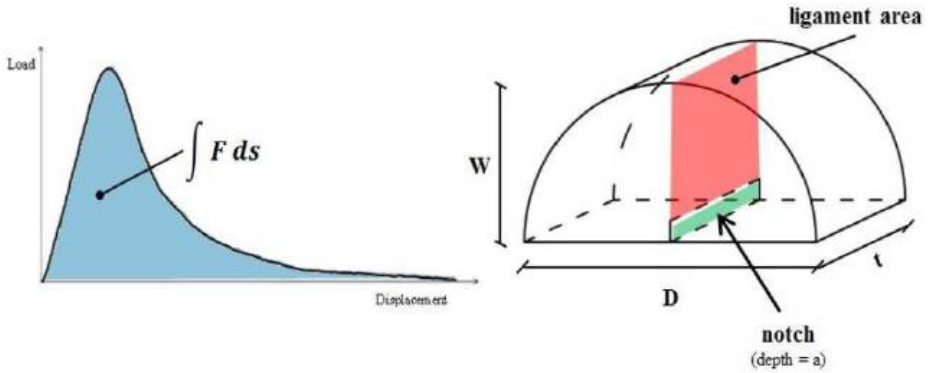


Figura 3.174. Energia di frattura

3.4 Programma Sperimentale

La sperimentazione è stata condotta nel Laboratorio di Strade "F. A. Santagata" del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. Il programma sperimentale ha previsto la caratterizzazione meccanica di provini pre-compattati in laboratorio mediante pressa giratoria al fine di comparare tre diversi conglomerati bituminosi: due ottenuti impiegando diversi bio-binder contenenti il 30% di lignina ed una miscela di riferimento. La caratterizzazione ha previsto l'esecuzione di test per la determinazione della suscettibilità termica mediante prova ITSM a 10-20-30-40°C e la resistenza a basse temperature (10°C) tramite prova SCB. Inoltre, sono state valutati i provini sia in condizione non invecchiata che invecchiata a lungo termine, simulata in laboratorio seguendo la procedura AASHTO R 30.

Nomenclatura dei provini

Per far sì che il riconoscimento dei provini sia più agevole, si riporta la dicitura con cui sono stati indicati i provini. In particolare, la nomenclatura prevede un codice alfanumerico (Figura 3.185) che tiene conto:

1. Della classe di bitume (50/100, 70/100 e 100/150);
2. Della tipologia di lignina impiegata (S, B);
3. Delle condizioni "*unaged*" o "*aged*".

Figura 3.185. Nomenclatura provino a titolo di esempio

La Tabella 3.4 riassume tutti i provini testati mediante prove ITSM per la valutazione della suscettibilità termica dei conglomerati bituminosi:

Tabella 3.4. Provini per la prova ITSM

Prova ITSM						
Codice provino	condizionamento	D [mm]	h [mm]	ν [-]	vuoti * [%]	Temperature di prova
50/70_3	unaged	100	59,6	0,35	4,74	10,20,30,40 °C
50/70_6	unaged	100	59,4	0,35	4,05	10,20,30,40 °C
50/70_8	unaged	100	59,8	0,35	4,26	10,20,30,40 °C
70/100_S_1	unaged	100	59,3	0,35	4,93	10,20,30,40 °C
70/100_S_3	unaged	100	59,5	0,35	5,13	10,20,30,40 °C
70/100_S_8	unaged	100	59,1	0,35	4,18	10,20,30,40 °C
100/150_B_1	unaged	100	59,6	0,35	5.94	10,20,30,40 °C
100/150_B_2	unaged	100	58,9	0,35	3.73	10,20,30,40 °C
100/150_B_8	unaged	100	59,6	0,35	4.19	10,20,30,40 °C
50/70_1	aged	100	59,4	0,35	4,54	10,20,30,40 °C
50/70_2	aged	100	59,2	0,35	4,27	10,20,30,40 °C
50/70_8	aged	100	59,3	0,35	3,61	10,20,30,40 °C
50/70_9	aged	100	59,5	0,35	4,01	10,20,30,40 °C
70/100_S_9	aged	100	59,2	0,35	4,31	10,20,30,40 °C
70/100_S_12	aged	100	60,1	0,35	5,08	10,20,30,40 °C
70/100_S_16	aged	100	60	0,35	4,56	10,20,30,40 °C
70/100_S_17	aged	100	59	0,35	3,76	10,20,30,40 °C
100/150_B_18	aged	100	59,3	0,35	4.35	10,20,30,40 °C
100/150_B_21	aged	100	60,2	0,35	5.27	10,20,30,40 °C
100/150_B_24	aged	100	59,3	0,35	3.82	10,20,30,40 °C
100/150_B_26	aged	100	59,1	0,35	3.58	10,20,30,40 °C

*Vuoti calcolati con il metodo wet (rif. Normativo uni en 12697-6)

1. 3 provini 50/70 per la prova ITSM unaged;
2. 4 provini 50/70 per la prova ITSM aged;
3. 3 provini 70/100_S per la prova ITSM unaged;
4. 4 provini 70/100_S per la prova ITSM aged;
5. 3 provini 100/150_B per la prova ITSM unaged;
6. 4 provini 100/150_B per la prova ITSM aged;

La Tabella 3.5 riassume tutti i provini testati mediante prove SCB per la valutazione della resistenza a frattura:

Tabella 3.5. Provini per la prova SCB

Prova SCB							
Codice provino	condizionamento	D	h	v	Vuoti* [%]	Temperature di prova	Codice provino
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
50/70_1	unaged	150	44,6	11	74	6,08	10 °C
50/70_2	unaged	150	44,6	10	73	6,47	10 °C
50/70_3	unaged	150	46,3	10	72	7,53	10 °C
50/70_4	unaged	150	47,6	10	73	6,3	10 °C
70/100_s_1	unaged	150	43,8	12	75	6,32	10 °C
70/100_s_2	unaged	150	44,3	10	74	6,22	10 °C
70/100_s_3	unaged	150	45,3	8	72	4,98	10 °C
70/100_s_4	unaged	150	45,3	8	72	5,61	10 °C
100/150_B_1	unaged	150	42,7	8	73	5,68	10 °C
100/150_B_2	unaged	150	42,4	11	74	6,58	10 °C
100/150_B_3	unaged	150	44,4	10	74	5,45	10 °C
100/150_B_4	unaged	150	41,1	10	73	6,02	10 °C
50/70_5	aged	150	42,5	9	72	6,2	10 °C
50/70_6	aged	150	44,0	10	73	4,76	10 °C
50/70_7	aged	150	45,9	9	71	5,13	10 °C
50/70_8	aged	150	43,2	9	71	6	10 °C
70/100_s_5	aged	150	46,9	10	73	5,68	10 °C
70/100_s_6	aged	150	42,7	10	73	5,98	10 °C
70/100_s_7	aged	150	46,3	11	73	5,7	10 °C
70/100_s_8	aged	150	42,1	9	72	6,03	10 °C
100/150_B_5	aged	150	42,2	9	72	5,76	10 °C
100/150_B_6	aged	150	41,9	10	73	5,49	10 °C
100/150_B_7	aged	150	43,8	12	74	5,4	10 °C
100/150_B_8	aged	150	43,7	9	72	6,4	10 °C

* Vuoti misurati con il *metodo wet* (rif. Normativo uni en 12697-6).

1. 4 provini 50/70 per la prova SCB unaged;
2. 4 provini 50/70 per la prova SCB aged;
3. 4 provini 70/100_S per la prova SCB unaged;
4. 4 provini 70/100_S per la prova SCB aged;
5. 4 provini 100/150_B per la prova SCB unaged;
6. 4 provini 100/150_B per la prova SCB aged;

Capitolo 4

Risultati della sperimentazione

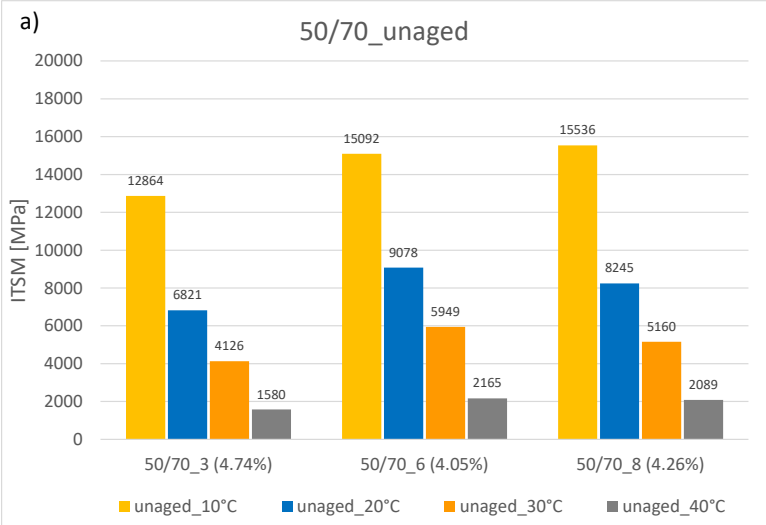
In questo capitolo verranno illustrati ed analizzati i risultati della sperimentazione. Si presenteranno prima i risultati inerenti allo studio della suscettibilità termica mediante prova ITSM condotta a 4 diverse temperature, e successivamente saranno analizzati i risultati di resistenza a frattura ottenuti con la prova SCB. Si ricorda che tutti i provini oggetto di studio sono stati realizzati a fronte di un processo di ottimizzazione delle miscele messe a punto durante un precedente lavoro di tesi. I campioni sono stati compattati in laboratorio mediante pressa giratoria nella modalità "ad altezza imposta" in modo da garantire le medesime proprietà geometriche (D=100 mm, h=60 mm) e volumetriche (contenuto di vuoti = 4,5±1%), scelti nel rispetto delle prescrizioni di Capitolato per lo strato di binder (3-6%).

4.1 Prove ITSM

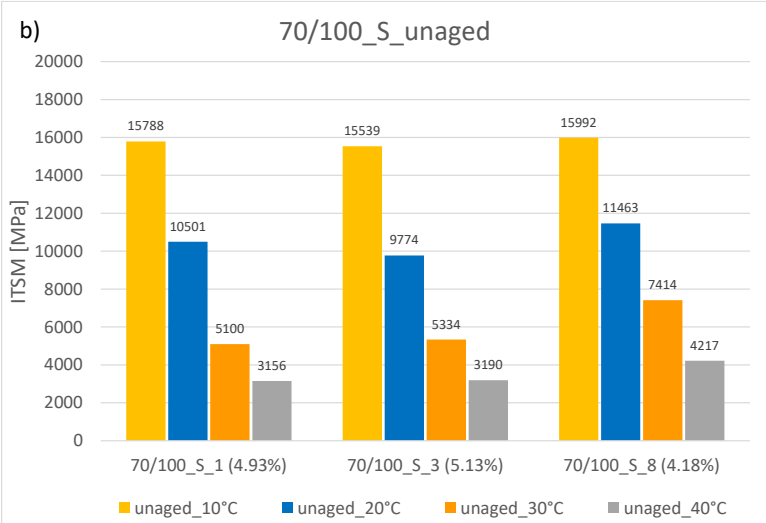
Per tutte le miscele studiate sono stati testati 3 provini in condizioni non invecchiate o "unaged" e 4 provini in condizioni invecchiate o "aged". Per ciascuno di essi si sono ottenuti i moduli di rigidezza dati dalla media dei valori ottenuti su due differenti diametri.

In seguito, si riportano in

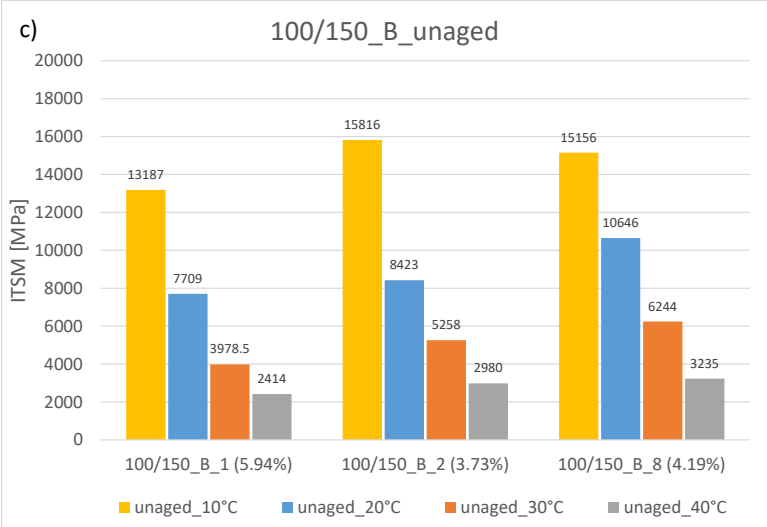
Figura 4. a), b), c) i risultati ottenuti per ciascun campione di ogni miscela studiata in condizioni *unaged.*



a)



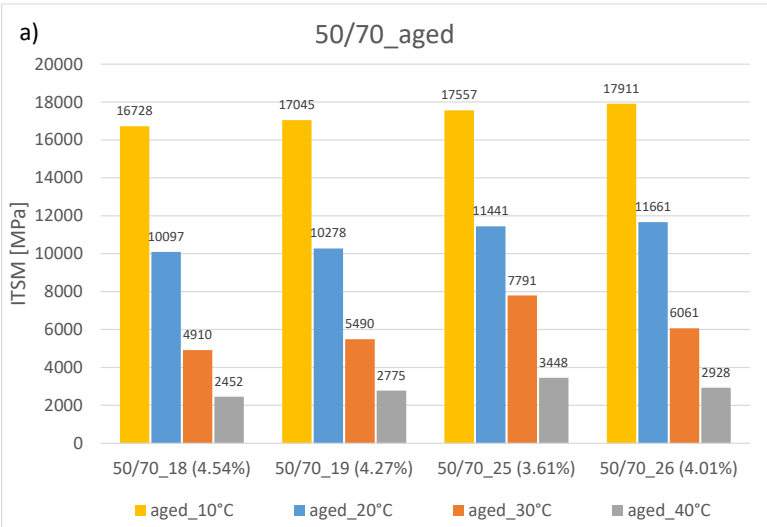
b)



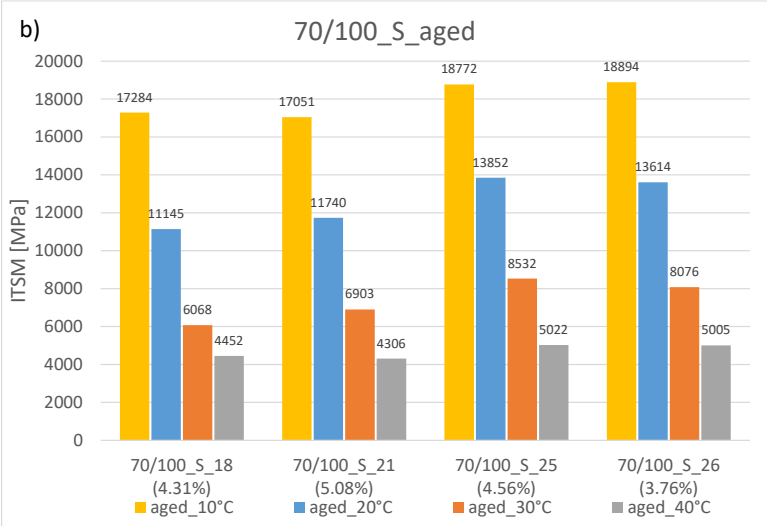
c)

Figura 4.1- Valori di rigidezza dei campioni in condizioni unaged

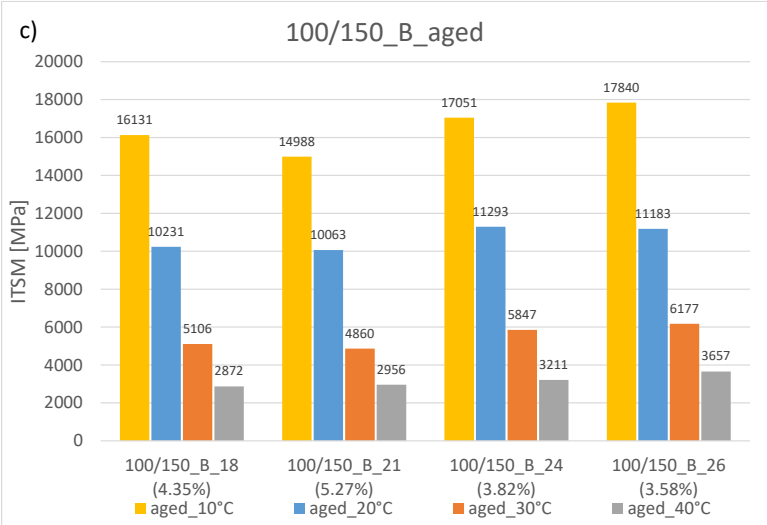
La stessa prova è stata effettuata in condizioni invecchiate, sottoponendo i provini ad un condizionamento di 85°C per 5 giorni consecutivi. I valori dei moduli ottenuti per le miscele studiate sono rappresentati graficamente nella *Figura 4.* a), b), c):



a)



b)

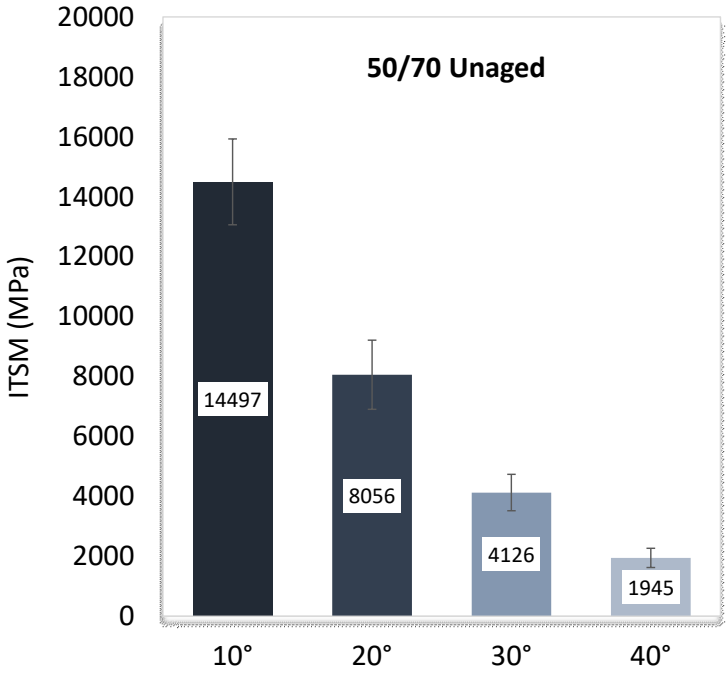


c)

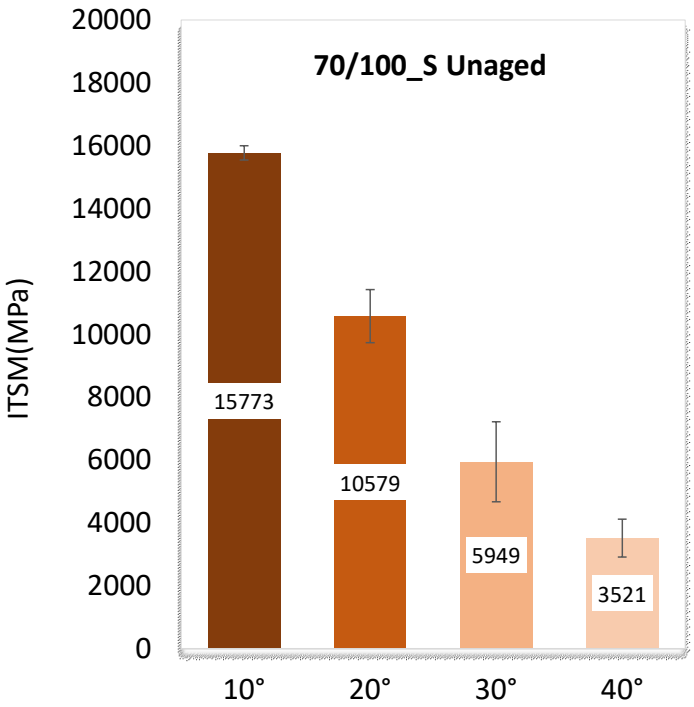
Figura 4.2 – Valori di rigidezza dei campioni in condizioni aged

In generale, i grafici mettono in luce una ridotta dispersione dei dati in termini di modulo di rigidezza sviluppato da ciascun provino a parità di temperatura, indice di una buona ripetibilità. A parità di materiale e temperatura investigati, è possibile notare la presenza di provini meno rigidi rispetto ad altri, come per esempio nel caso del 50/70_3(unaged) o 100/150_B_1 (unaged) o 100/150_B_21 (aged). Tuttavia, non si tratta di differenze significative e sono attribuibili al maggior contenuto di vuoti (indicato tra parentesi accanto al codice di ciascun provino). Va comunque specificato che tutti i vuoti appartengono al range di accettabilità dettato dal Capitolato di riferimento, che per uno strato di binder varia dal 3 al 6%.

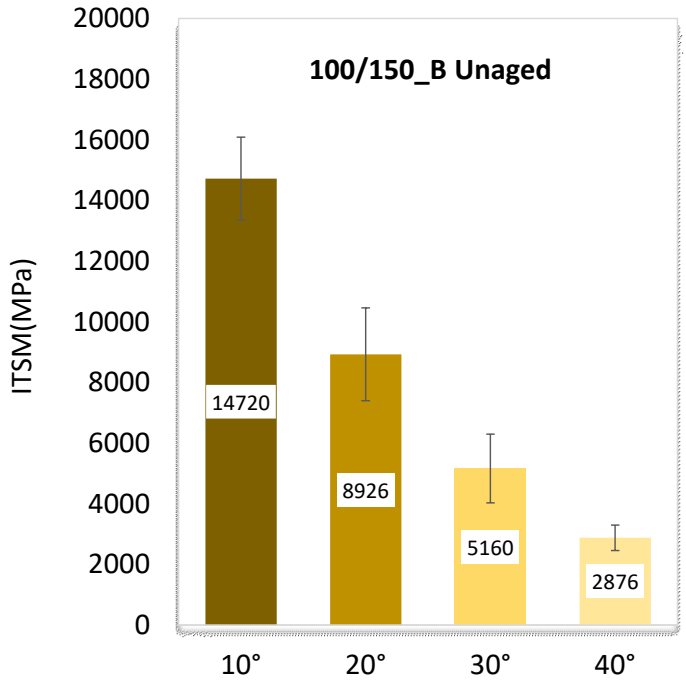
In *Figura 4*. a), b), c) vengono riportati i valori medi dei moduli di rigidezza ottenuti per ciascuna miscela e temperatura.



a)



b)

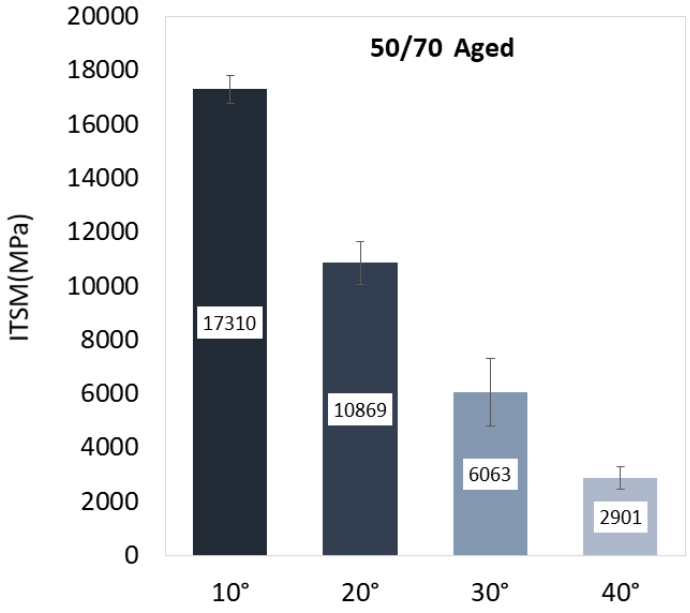


c)

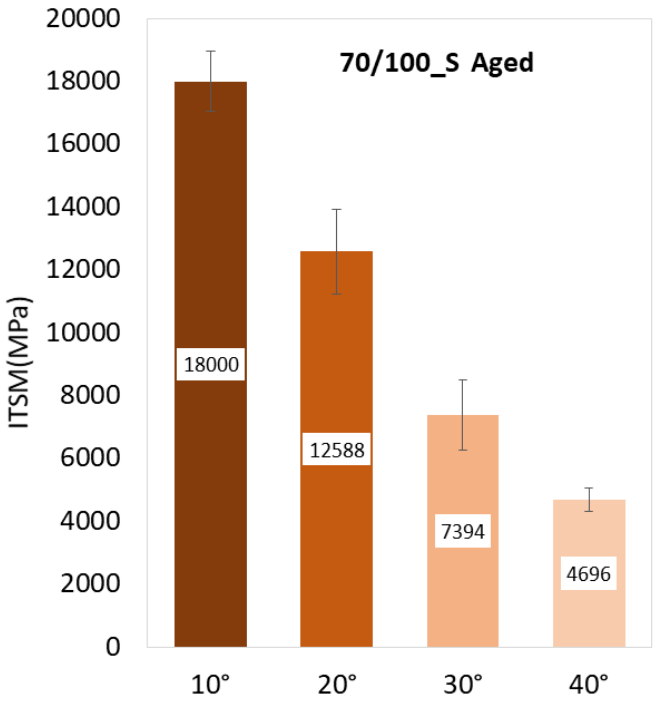
Figura 4.3 – Moduli di rigidezza alle diverse di temperature in condizione unaged

Dall' analisi dei risultati appena esposti si evince che per tutte e tre le miscele in condizioni *unaged* aumentando la temperatura diminuisce il modulo di rigidezza, e questo è in linea con i risultati attesi, in quanto l'aumento della temperatura conferisce una perdita di consistenza del legante e di conseguenza della miscela.

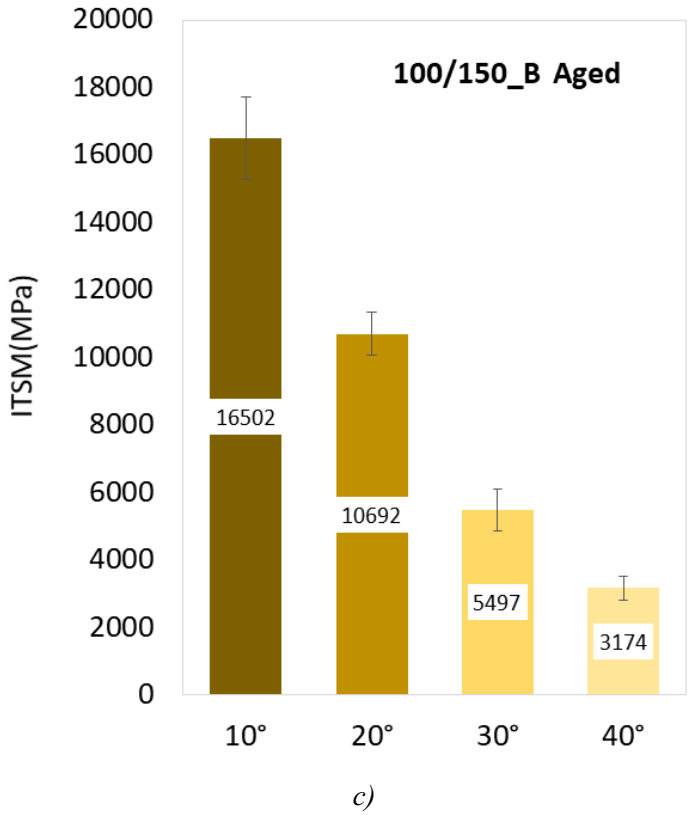
In Figura .4 a), b), c) si illustrano i grafici sulla suscettibilità termica valutata per tre famiglie 50/70, 70/100_S e 100/150_B in condizioni *aged.*


50/70 Aged
ITSM(MPa)
20000
18000
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
17310
10869
6063
2901
10°
20°
30°
40°

a)


70/100_S Aged
ITSM(MPa)
20000
18000
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
18000
12588
7394
4696
10°
20°
30°
40°

b)



c)

Figura 4.4. - Moduli di rigidezza alle diverse di temperature in condizione aged

Come precedentemente detto, anche in condizioni *aged* si assiste al medesimo decremento di rigidezza all'aumentare della temperatura per qualsiasi miscela testata. Ovviamente, data la condizione di invecchiamento dei provini, questi mostrano valori di rigidezza più elevati rispetto ai corrispettivi *unaged*, frutto dell'irrigidimento e dell'ossidazione causata dal processo di invecchiamento.

Al fine di poter avere un confronto di insieme tra le tre diverse miscele, la Figura 4. mostra i valori di ITSM medi e la relativa dispersione per ciascuna famiglia di provini testati in condizioni *unaged* a ciascuna temperatura.

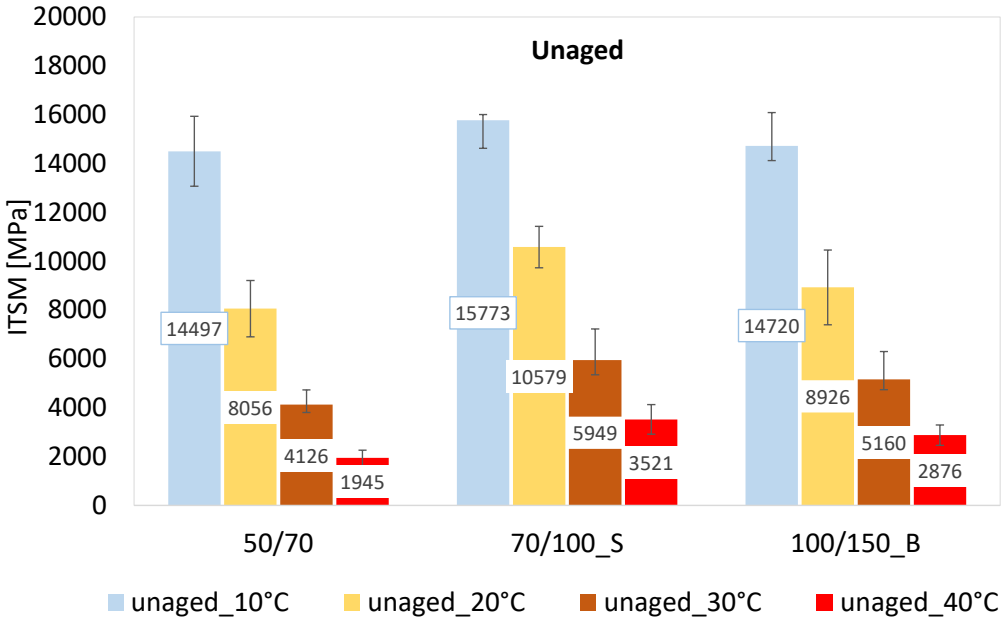


Figura 4.5 – Valori medi di ITSM in condizioni unaged

Dal diagramma precedente è possibile constatare che la miscela che presenta la maggiore rigidezza è la 70/100_S, mentre la 100/150_B risulta essere più confrontabile alla miscela 50/70 di riferimento, soprattutto alle temperature più basse. Nel complesso, le tre miscele possono essere considerate confrontabili tra loro.

Inoltre, al fine di voler valutare la suscettibilità nei confronti della variazione di temperatura, si è calcolata la riduzione percentuale tra 10°C e 20°C, tra 20°C e 30°C, 30°C e 40°C per ogni miscela.

In Tabella 4.6 si riporta la variazione percentuale di rigidezza risentita da ciascun gruppo di provini tra due temperature consecutive.

Tabella 4.6 - Variazione percentuale di rigidezza

UNAGED			
(%)	50/70	70/100_S	100/150_B
$\Delta ITSM_{(10°-20°)}$	44.43	32.93	39.36
$\Delta ITSM_{(20°-30°)}$	48.78	43.77	42.19
$\Delta ITSM_{(30°-40°)}$	52.87	40.81	44.26

Dalla Tabella 4.6 si evince che la miscela realizzata con bio-legante 70/100_S risulta essere non solo la più rigida, ma anche quella meno sensibile alla variazione di temperatura, con valori di Δ inferiori rispetto agli altri due materiali, seguita dalla miscela 100/150_B e 50/70. Inoltre, tutte e tre le miscele evidenziano un incremento della variazione percentuale alle alte temperature. Di conseguenza è possibile affermare che in condizioni *unaged* le due miscele

sperimentali risultano essere meno suscettibili alla temperatura rispetto alla miscela di riferimento; dunque, la lignina sembra garantire un miglioramento delle prestazioni in questo senso.

La Figura 4. mostra i valori di ITSM medi e la relativa dispersione per ciascuna famiglia di provini testati in condizioni *aged* a ciascuna temperatura. Inoltre, in Tabella 4.1 si è calcolata la variazione percentuale di rigidezza risentita da ciascun gruppo di provini tra 10°C e 20°C, tra 20°C e 30°C, 30°C e 40°C.

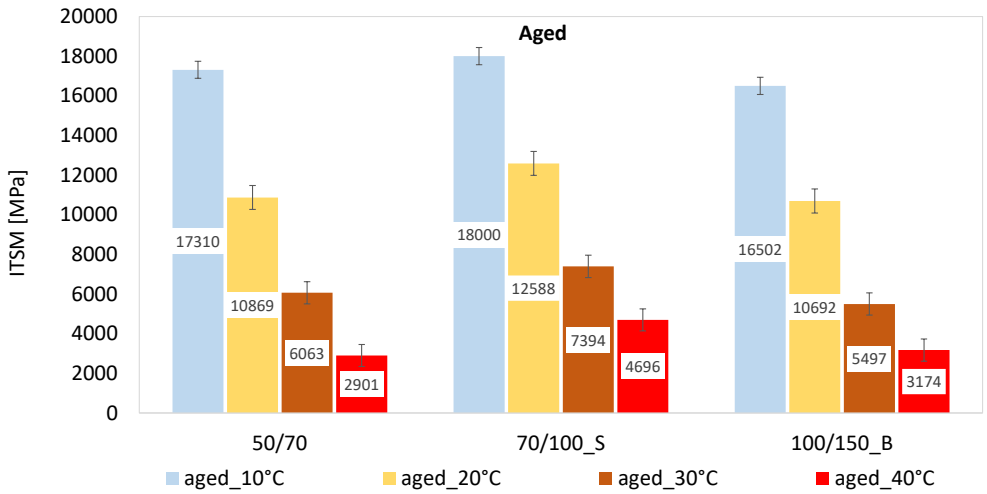


Figura 4.6 - Valori medi di ITSM in condizioni aged

Dal confronto è possibile vedere che anche in condizioni invecchiate la miscela che presenta la maggiore rigidezza è la 70/100_S, seguita dalle miscele 50/70 e 100/150_B che si discostano di poco.

La Tabella 4.7 mostra i valori di ITSM medi e la relativa dispersione per ciascuna famiglia di provini testati in condizioni *aged* a ciascuna temperatura.

Tabella 4.7 - Variazione percentuale di rigidezza

AGED			
(%)	50/70	70/100_S	100/150_B
$\Delta ITSM_{(10°-20°)}$	37.21	30.07	35.21
$\Delta ITSM_{(20°-30°)}$	44.22	41.26	48.59
$\Delta ITSM_{(30°-40°)}$	52.16	36.49	42.27

In merito alla valutazione della suscettibilità termica, dal calcolo della riduzione percentuale tra 10°C e 20°C, 20°C e 30°C, 30°C e 40°C si evince che la miscela realizzata con bio-legante 70/100_S risulta essere ancora una volta quella meno sensibile alla variazione di temperatura, con valori di Δ inferiori rispetto agli altri due materiali, seguita dalla miscela 100/150_B. Inoltre, le miscele contenenti bio-binder evidenziano un incremento della variazione percentuale alle alte temperature meno significativa rispetto a quella mostrata dalla miscela di riferimento, mentre variazioni meno sensibili sono apprezzabili a temperature più basse.

Nel complesso è possibile affermare che in condizioni *aged* le due miscele sperimentali risultano essere mediamente meno suscettibili alla temperatura rispetto alla miscela di riferimento; pertanto, anche in questo caso, la lignina sembra garantire un miglioramento delle prestazioni.

Con l'obiettivo di valutare la suscettibilità nei confronti dell'invecchiamento al variare della temperatura, in Tabella 4.3 è stato calcolato il rapporto tra ITSM *Aged* e ITSM *Unaged* di ciascun materiale a ciascuna temperatura investigata.

Tabella 4.8 - Rapporto tra ITSM Aged e ITSM Unaged

	50/70	70/100_S	100/150_B
T	$\frac{ITSM Aged}{ITSM Unaged}$	$\frac{ITSM Aged}{ITSM Unaged}$	$\frac{ITSM Aged}{ITSM Unaged}$
°C	[-]	[-]	[-]
10°	1.19	1.14	1.12
20°	1.35	1.19	1.20
30°	1.47	1.24	1.07
40°	1.49	1.33	1.10

Come previsto, tutti i rapporti risultano maggiori di 1, dato che l'invecchiamento comporta sempre un incremento della rigidezza indipendentemente dal tipo di materiale e temperatura. Chiaramente, più il rapporto tende a 1 minore sarà la sensibilità del materiale nei confronti dell'invecchiamento. Viceversa, valori più alti indicano un materiale più suscettibile agli effetti di irrigidimento dovuti all'ossidazione della fase legante.

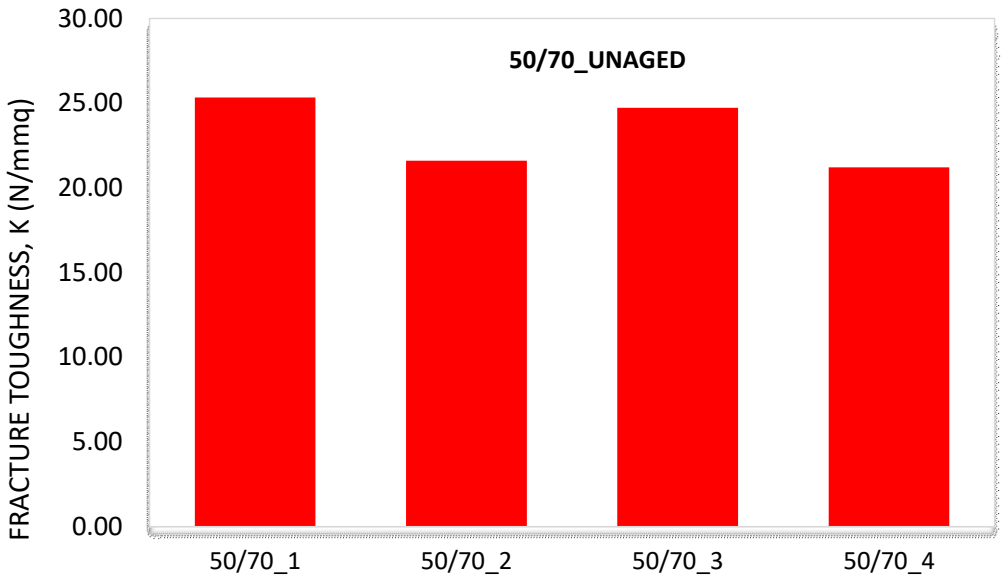
Per ogni temperatura indagata, le miscele contenenti lignina presentano valori molto simili tra loro, e più bassi rispetto alla miscela di riferimento. Ciò potrebbe essere attribuibile all'effetto benefico della lignina, nota in letteratura per le sue proprietà antiossidanti [8], o al fatto che essendo minore il contenuto di bitume presente nelle bio-miscele (riduzione del 15% rispetto alla miscela di riferimento), l'ossidazione riguarderà una minor quantità di materiale e sarà pertanto meno visibile. Probabilmente, tale risultato potrebbe derivare dalla combinazione di questi due effetti.

4.2 Prove SCB

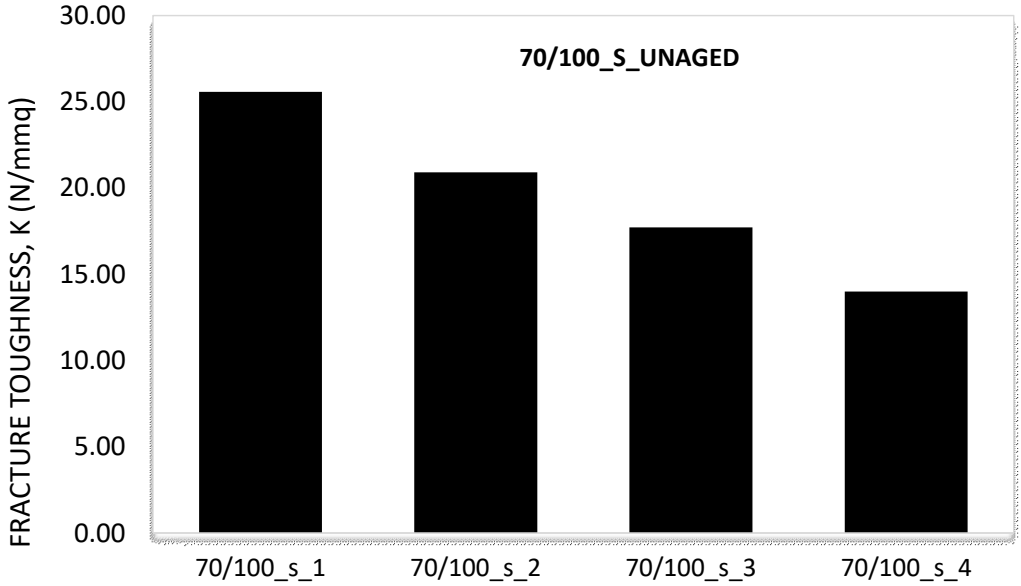
Per tutte le miscele studiate sono stati testati 4 provini in condizioni non invecchiate o "*unaged*" e 4 provini in condizioni invecchiate o "*aged*". Le prove SCB sono state condotte alla temperatura di 10 °C, e sono stati calcolati, a partire dal carico di rottura e dalla deformazione a compressione misurati, la tenacità (o fracture thoughness) e l'energia di frattura (fracture energy).

4.2.1 Fracture thoughness

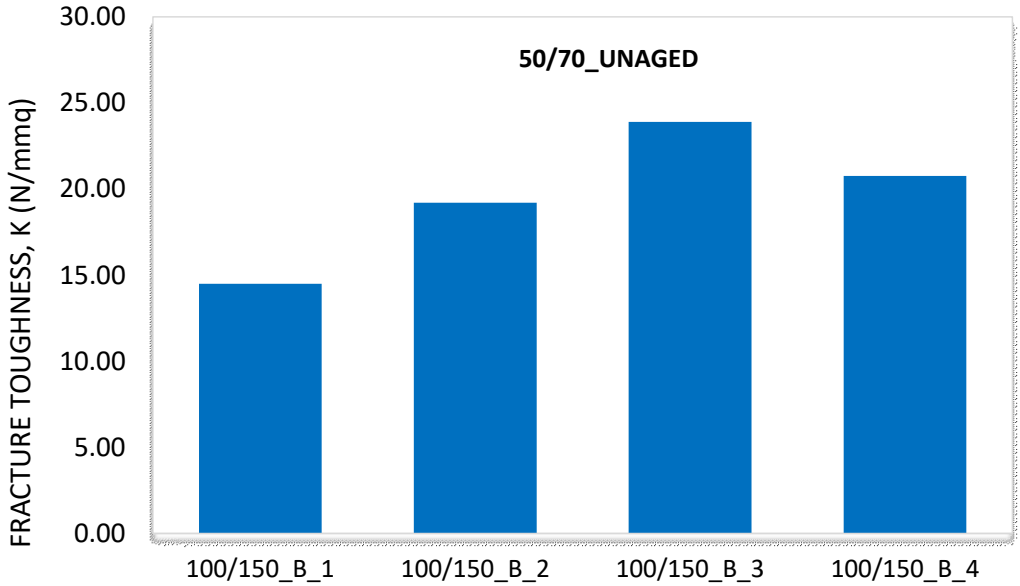
In seguito, si riportano in Figura 4. a), b), c) i risultati ottenuti in termini di *fracture thoughness* per ciascun campione di ogni miscela studiata in condizioni *unaged.*



a)



b)



c)

Figura 4.7 - Valori di tenacità dei campioni in condizioni unaged

In Figura 4. vengono riportati i valori medi della fracture thoughness ottenuti per ciascuna miscela in condizioni unaged.

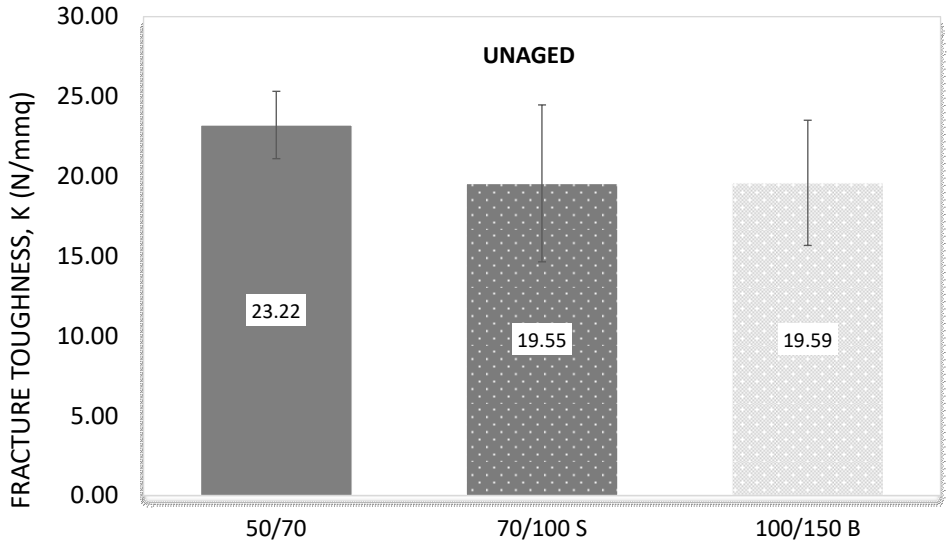
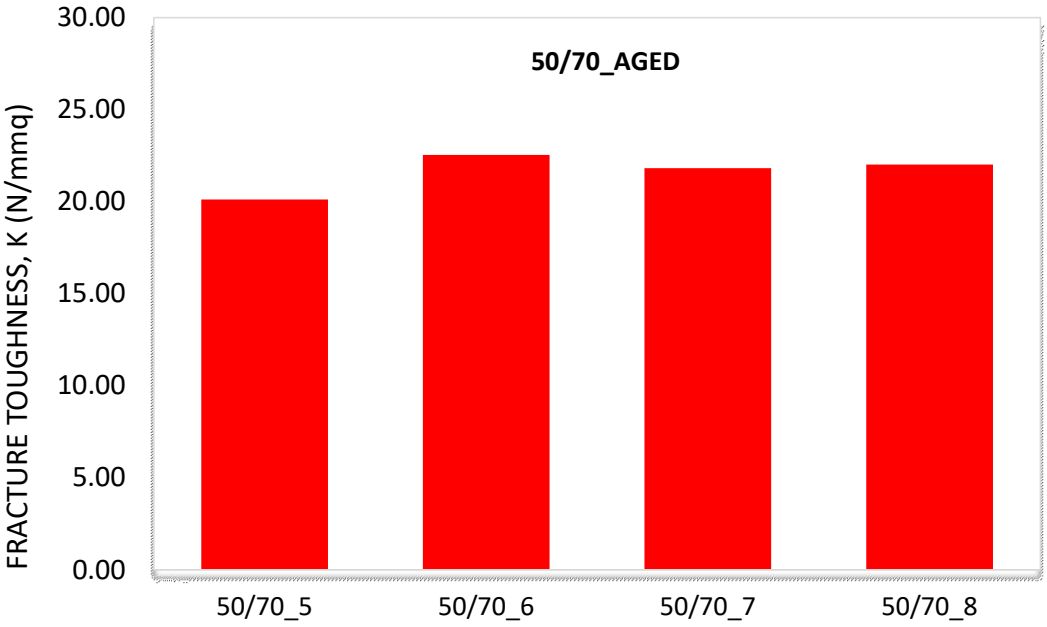


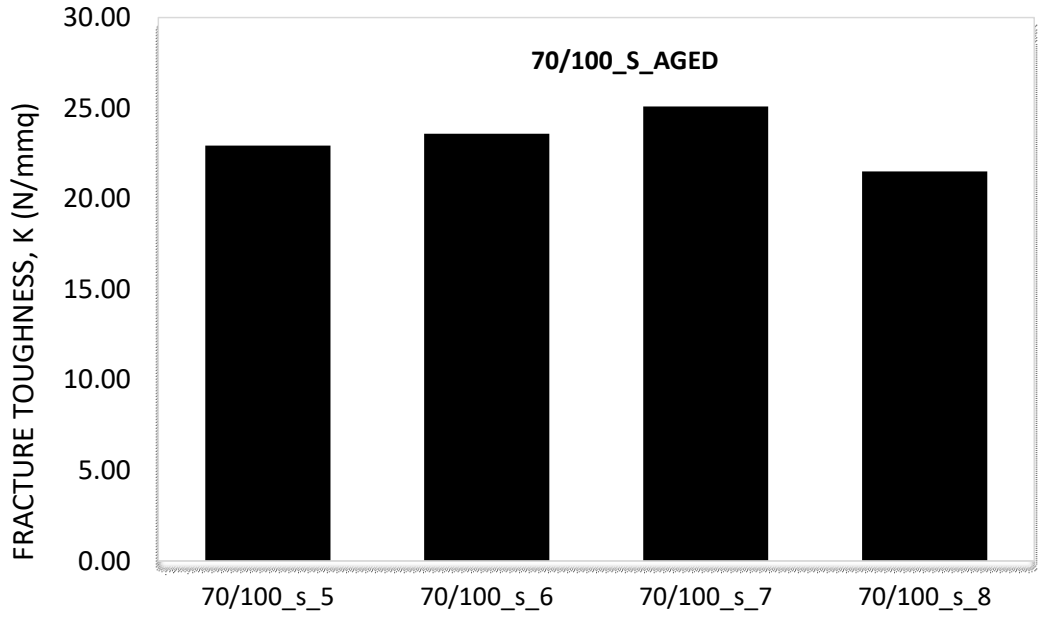
Figura 4.8 - Valori medi della fracture thoughness

In condizioni non invecchiate è evidente che le miscele contenenti bio-leganti siano meno tenaci rispetto alla miscela di riferimento, e mostrano anche una maggior dispersione dei dati, sinonimo di una minor ripetibilità. Ciò potrebbe essere attribuibile all'omogeneità della dispersione della lignina nel legante e, di conseguenza, nei provini in conglomerato bituminoso.

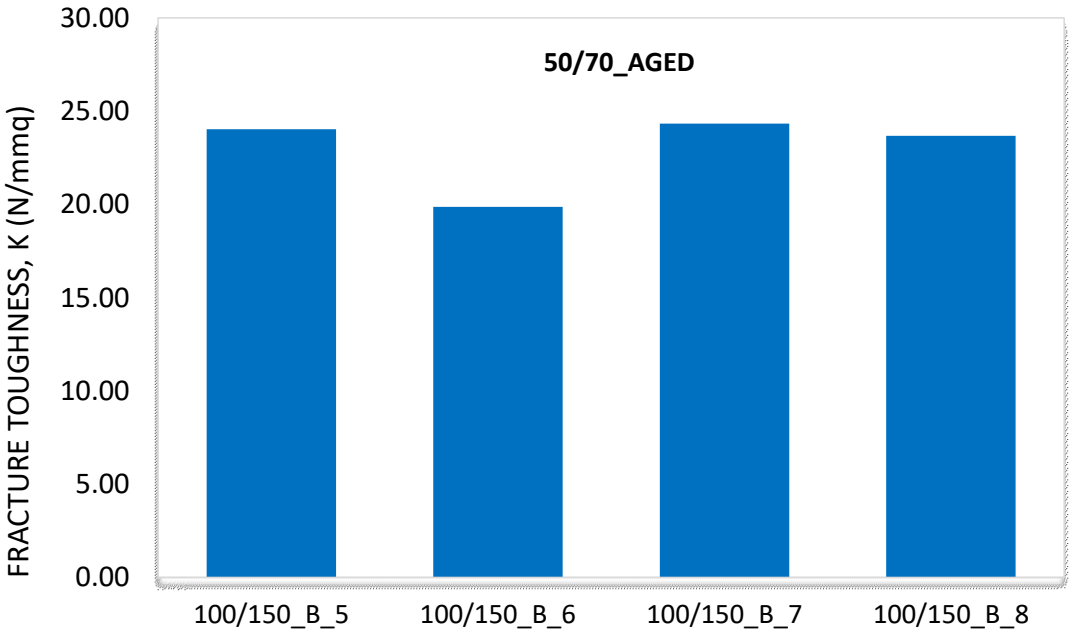
In seguito, si riportano in *Figura 4.* a), b), c) i risultati ottenuti in fermini di *fracture thoughness* per ciascun campione di ogni miscela studiata in condizioni *aged.*


50/70_AGED
FRACTURE TOUGHNESS, K (N/mmq)
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
50/70_5
50/70_6
50/70_7
50/70_8

a)


70/100_S_AGED
FRACTURE TOUGHNESS, K (N/mmq)
30.00
25.00
20.00
15.00
10.00
5.00
0.00
70/100_s_5
70/100_s_6
70/100_s_7
70/100_s_8

b)



c)

Figura 4.9 - Valori di tenacità dei campioni in condizioni aged

In Figura 4. vengono riportati i valori medi della fracture thoughness ottenuti per ciascuna miscela in condizioni aged.

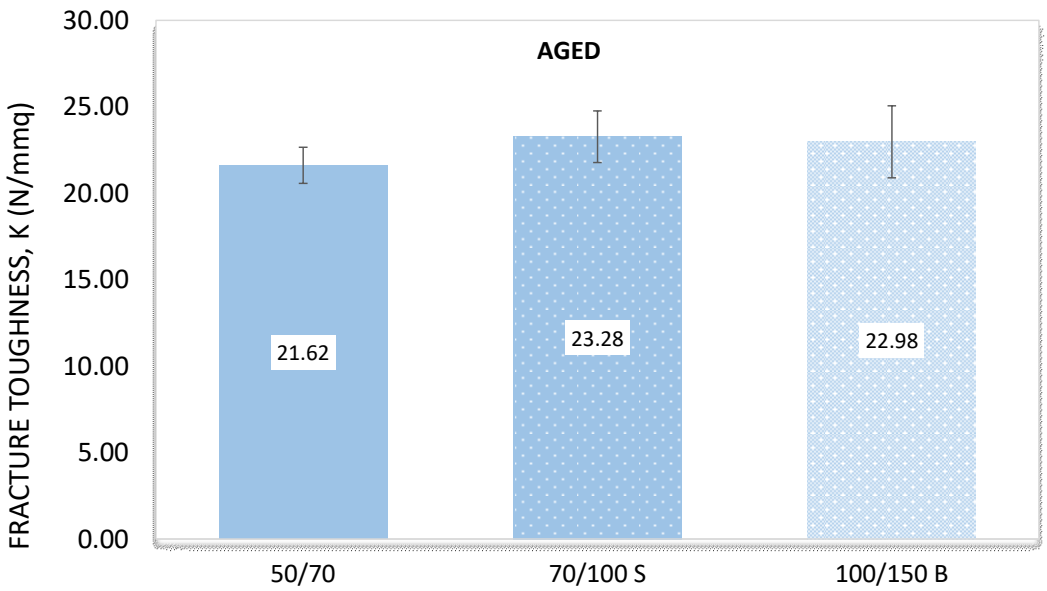


Figura 4.10 - Valori medi della fracture thoughness

Diversi sono i risultati ottenuti in condizioni invecchiate, rispetto ai risultati precedenti, dove la tendenza è esattamente invertita, con le miscele 70/100_S e 100/150_B più tenaci rispetto a quella di riferimento 50/70.

In Figura 4. vengono riportati i valori medi della fracture thoughness ottenuti per ciascuna miscela in condizione unaged e aged.

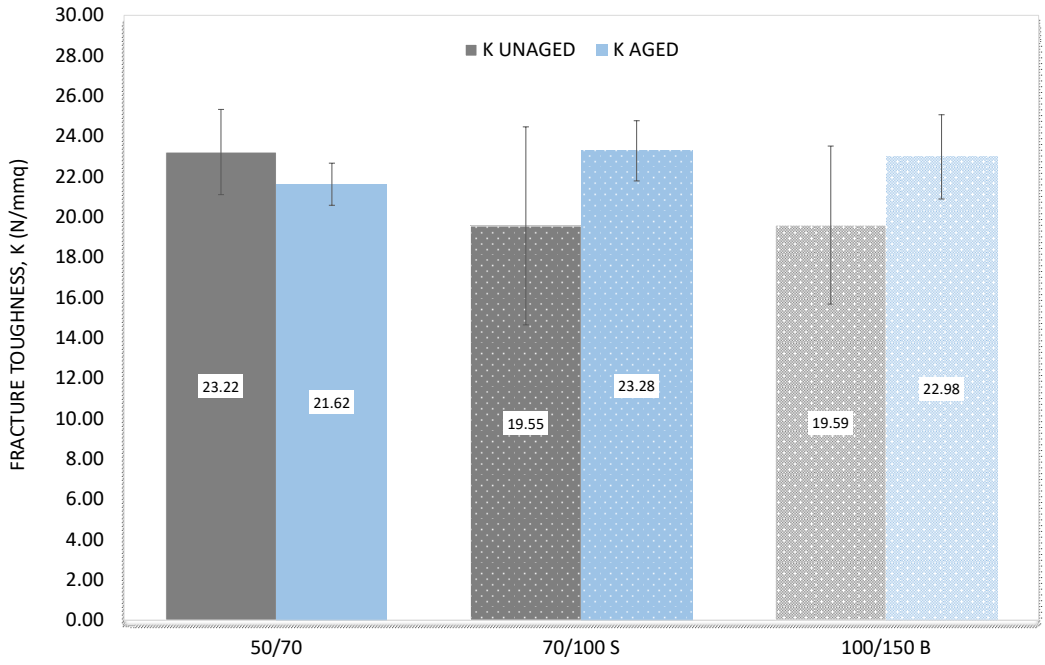
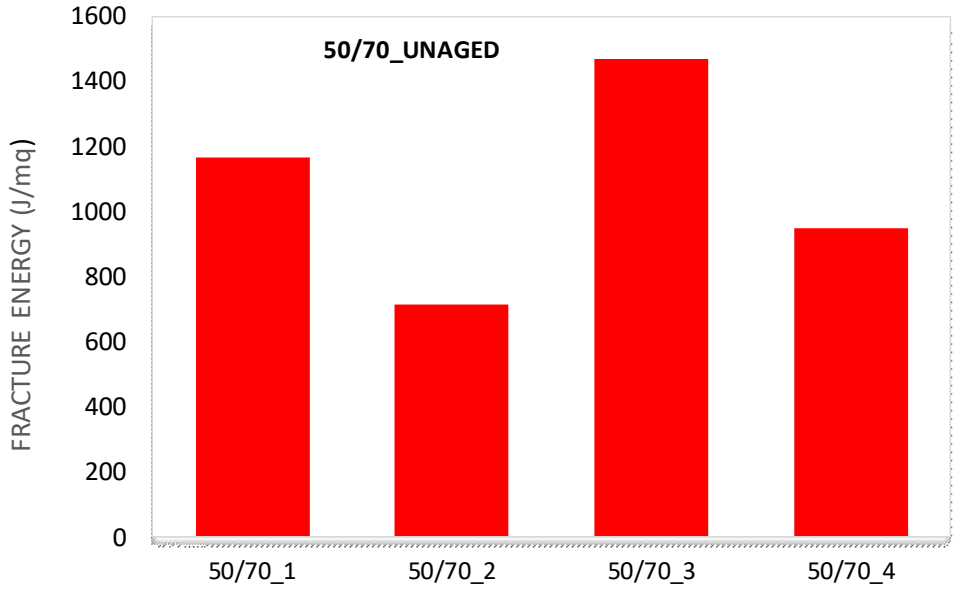


Figura 4.11 – Confronto della tenacità tra le miscele in condizioni unaged e aged.

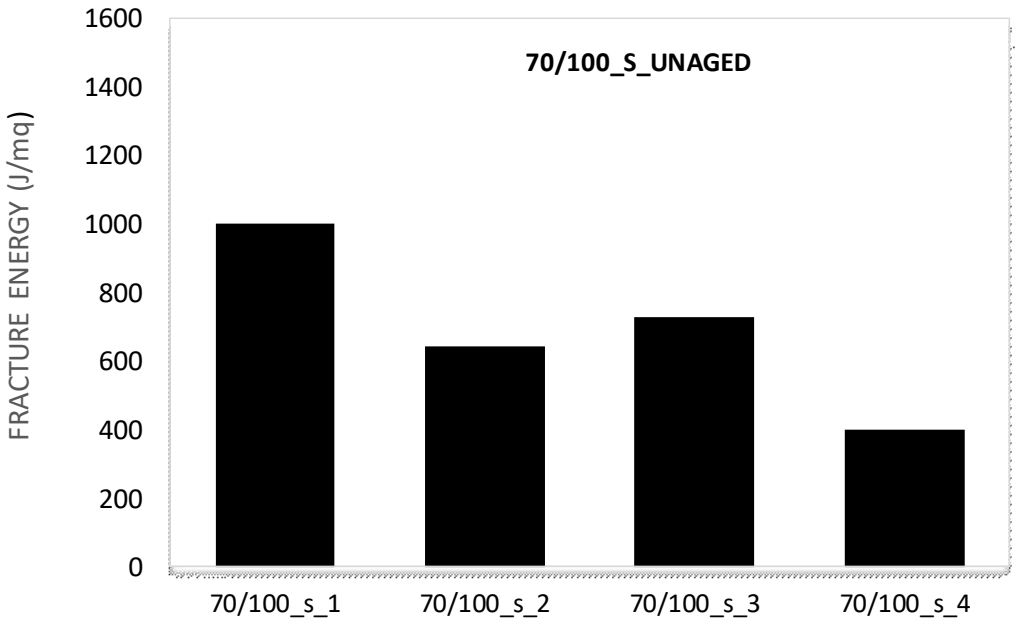
Dal grafico di confronto è evidente come la tendenza dei risultati ottenuti per le due famiglie di miscele risulti essere opposto. Ciò confermerebbe la minor suscettibilità delle bio-miscele nei confronti dell'invecchiamento, evidenziando migliori performance in tali condizioni rispetto alla miscela di riferimento.

4.2.2 Fracture Energy

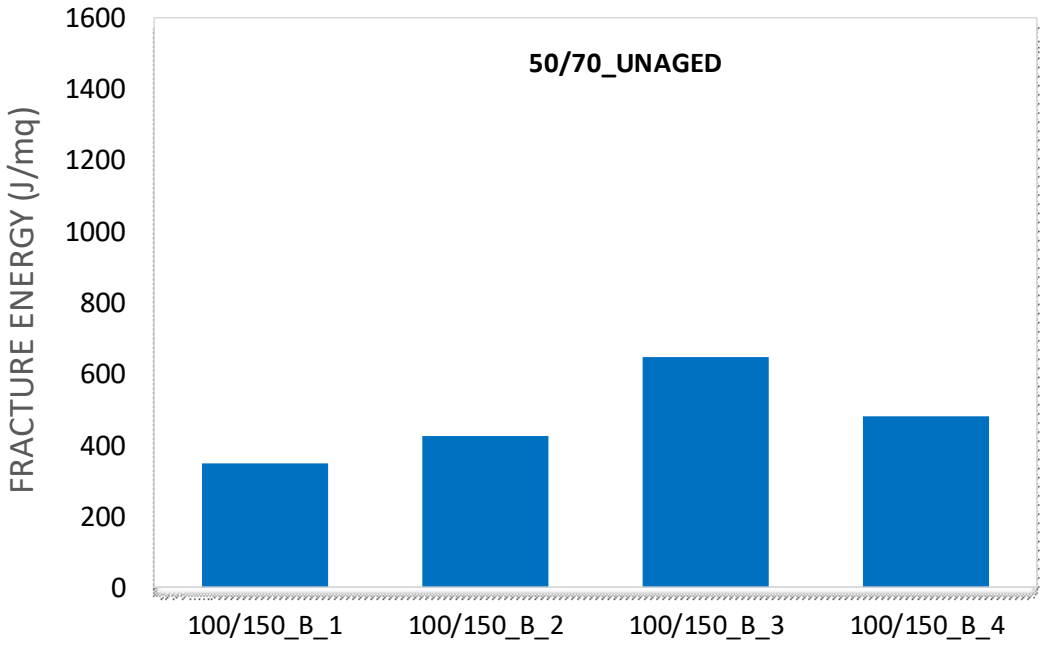
In seguito, si riportano in *Figura 4* a), b), c) i risultati ottenuti in termini di *fracture energy* per ciascun campione di ogni miscela studiata in condizioni *unaged.*



a)



b)



c)

Figura 4.12-Valori dell'energia di frattura in condizioni unaged

In *Figura 4.* vengono riportati i valori medi della fracture energy ottenuti per ciascuna miscela in condizioni *unaged* .

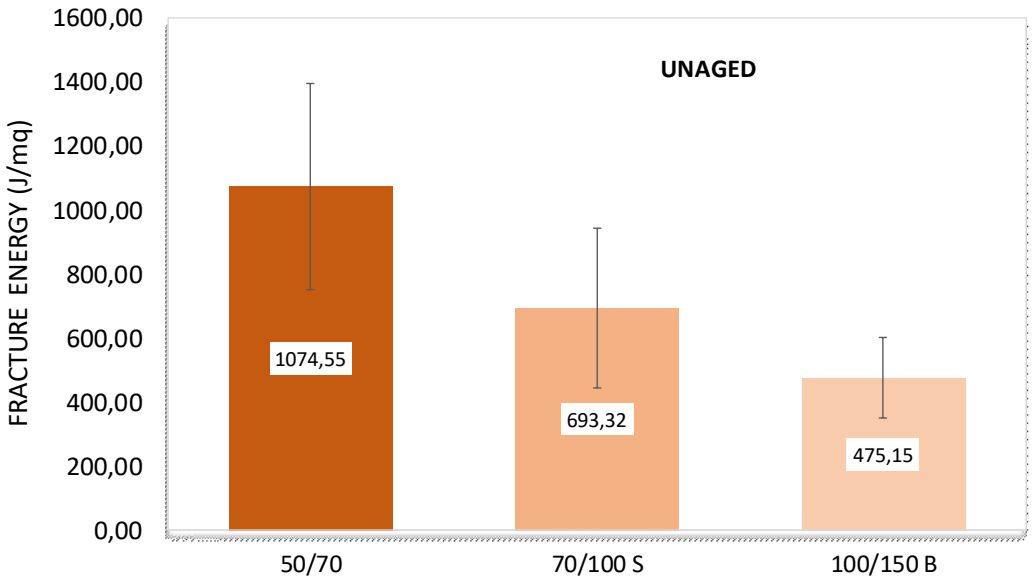


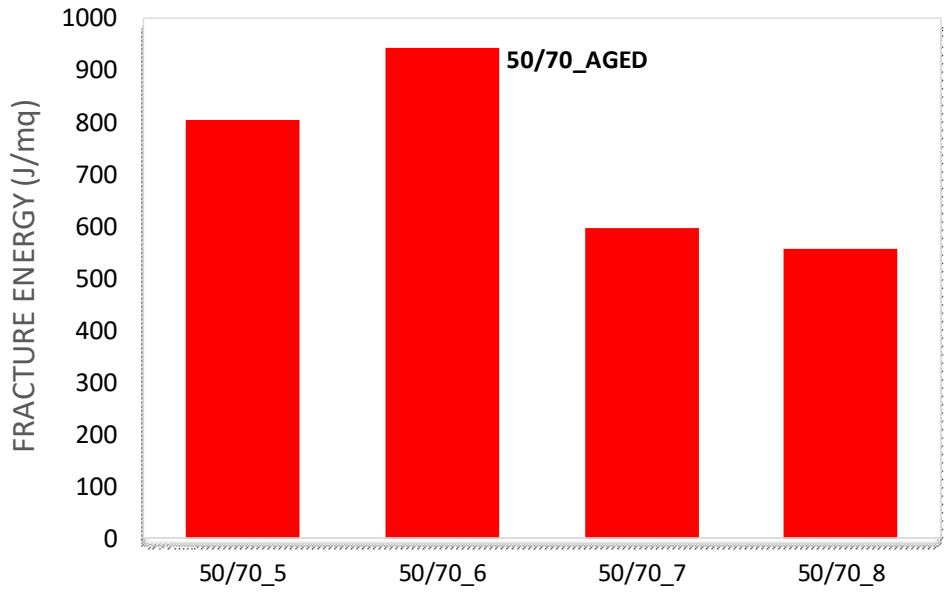
Figura 4.13-Valori medi della fracture energy

Dal grafico precedente si osserva come l'energia di frattura risulta essere penalizzata dalla presenza di lignina rispetto alla miscela di riferimento. Questo effetto risulta essere coerente rispetto a quanto definito in letteratura. Inoltre, è possibile notare che la miscela 100/150B

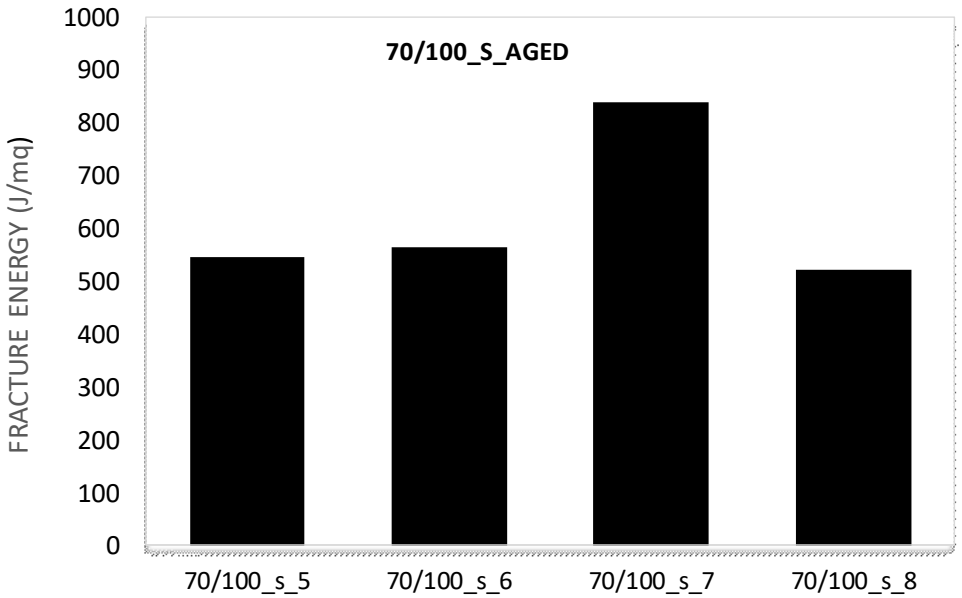
risulta essere la più penalizzata, con un decremento dell'Energia di frattura di più del 50%, mentre la miscela 70/100S mostra un comportamento intermedio. Ciò potrebbe essere imputabile al tipo di lignina impiegata, data l'estrema dipendenza prestazionale dalla materia prima di origine e dal processo produttivo impiegato per lavorarla.

In seguito, si riportano in

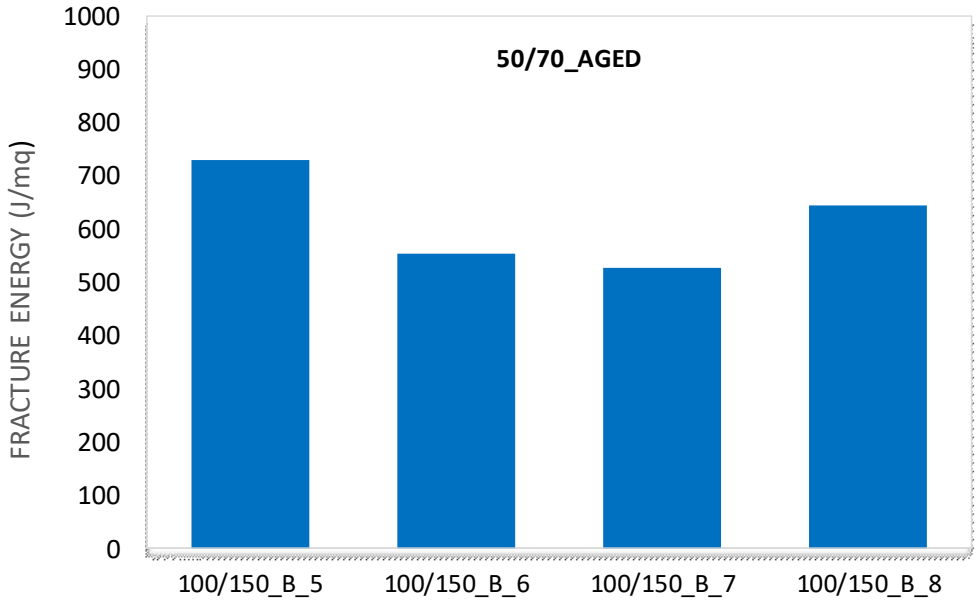
Figura *4.* a), b), c) i risultati ottenuti in termini di *fracture energy* per ciascun campione di ogni miscela studiata in condizioni *aged.*



a)



b)



c)

Figura 4.14-Valori dell'energia di frattura in condizioni aged

In *Figura 4.* a vengono riportati i valori medi della fracture energy ottenuti per ciascuna miscela in condizioni *aged.*

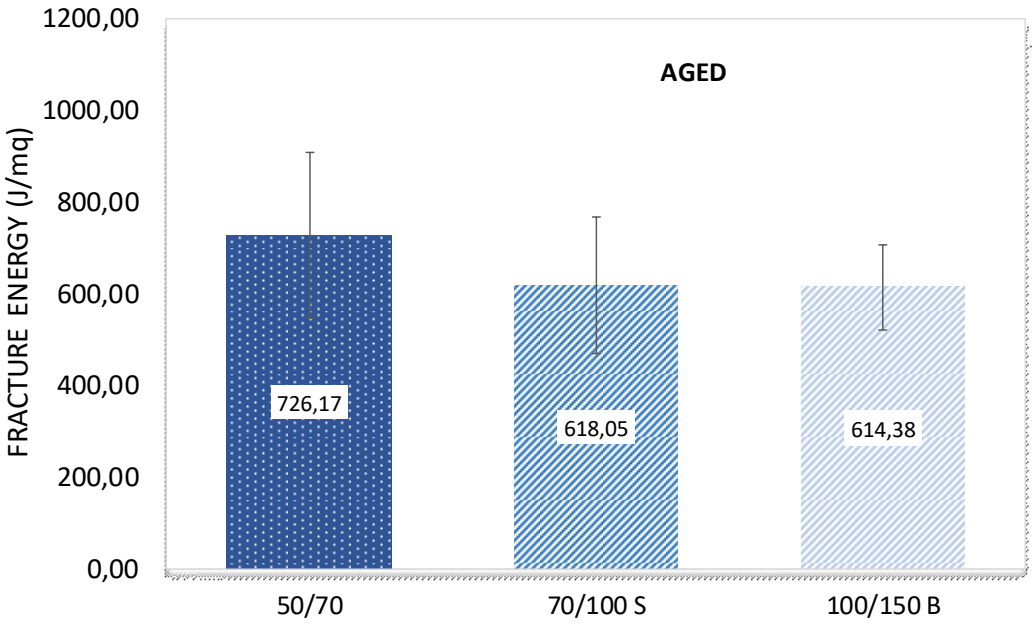


Figura 4.15-Valori medi della fracture energy

Analogamente alle condizioni “unaged”, anche per i materiali invecchiati la lignina penalizza l’energia di frattura rispetto alla miscela di riferimento, ma in maniera molto meno evidente. In *Figura 4.* vengono riportati i valori medi della fracture energy ottenuti per ciascuna miscela sia in condizioni unaged che *aged,* illustrando il confronto diretto tra essi.

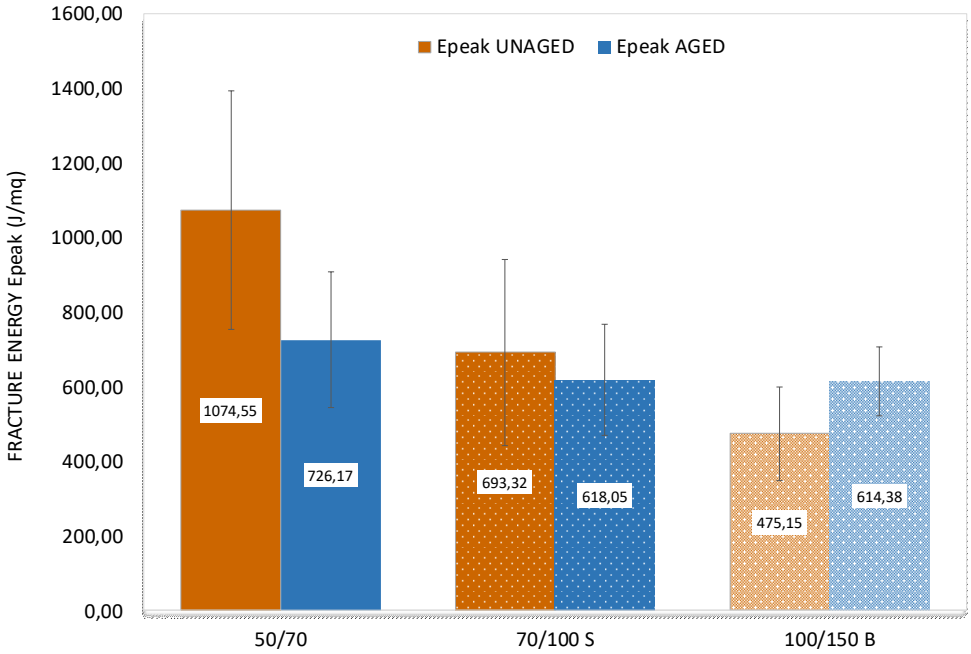


Figura 4.16-Confronto dell’energia di frattura tra le miscele in condizioni unaged e aged

In questo grafico viene confrontata l’energia di frattura a basse temperature in condizioni non invecchiate e invecchiate. In generale, si denota una penalizzazione delle prestazioni delle bio-miscele contenenti lignina in entrambe i casi, unaged e aged sostenendo le ipotesi di Arafat et al [7] e ciò confermerebbe quanto è già noto in letteratura. Volendo focalizzarsi invece sulle condizioni invecchiate, i materiali contenenti lignina sembrano di gran lunga meno suscettibili all’effetto dell’invecchiamento. La miscela 100/150_B sembra addirittura migliorare la propria risposta rispetto alla corrispettiva configurazione non invecchiata, mentre per la miscela 70/100_S si osserva una riduzione percentuale di gran lunga meno marcata rispetto alla miscela di riferimento, la quale risulta molto penalizzata dagli effetti dell’invecchiamento.

Conclusioni

Al giorno d'oggi sostenibilità ed economia circolare sono due principi cardine che regolano la scelta dei materiali da impiegare nel campo dell'ingegneria civile e delle pavimentazioni stradali. Pertanto, attualmente la ricerca è volta allo studio di materiali innovativi, che consentano la totale o parziale sostituzione di fonti non rinnovabili come il bitume, introducendo materiali "green" denominati bio-leganti.

In tale ambito, la presente sperimentazione si è occupata di studiare l'applicazione di due bio-leganti contenenti lignina, un bio-polimero naturale, nelle miscele in conglomerato bituminoso. Precedenti lavori di tesi si sono focalizzati sull'ottimizzazione della fase legante, ottenuta a partire da due bitumi di classe di consistenza 70/100 e 100/150 i quali sono state rispettivamente sostituiti con il 30% di lignina S e B. Successivamente tali bio-leganti sono stati impiegati nella produzione di miscele in conglomerato bituminoso, con cui sono stato stati prodotti dei provini di laboratorio.

Pertanto, la presente indagine sperimentale ha previsto la caratterizzazione meccanica di tali bio-miscele (denominate 70/100_S e 100/150_B) valutando la suscettibilità termica attraverso Prove di Modulo a Trazione Indiretta (ITSM) e la resistenza a frattura tramite Semi-Circular Bending Test. I risultati sono stati confrontati con una miscela tradizionale adottata come riferimento, e sono state valutate sia le condizioni "tal quali" che di invecchiamento a lungo termine.

Alla luce dei risultati emersi da tale sperimentazione, è risultato quanto segue:

- Lo studio dei moduli di rigidezza a diverse temperature conferma la termo-dipendenza dei conglomerati bituminosi, causando una riduzione della consistenza all'aumentare della temperatura e viceversa. Le bio-miscele mostrano una maggior rigidezza rispetto alla miscela di riferimento, nonostante la simile consistenza dei leganti impiegati. Tali differenze si accentuano alle alte temperature, esplicitando una minore suscettibilità termica, in particolar modo della miscela 70/100_S. Gli stessi effetti sono riscontrati sia in condizioni non invecchiate che invecchiate.

- L’invecchiamento produce un irrigidimento di tutte le miscele rispetto alle rispettive condizioni *unaged,* ma gli effetti risultano essere meno marcati per le miscele contenenti bio-leganti. La minor propensione all’invecchiamento potrebbe essere imputabile alle capacità antiossidanti attribuibili alla lignina, o al fatto che tali bio-miscele hanno un minor contenuto di bitume. Più probabilmente, la combinazione dei due effetti rende le bio-miscele meno suscettibili all’invecchiamento.
- L’analisi della resistenza a frattura a basse temperature mostra che le bio-miscele sembrano ridurre leggermente la tenacità in condizioni non invecchiate, al contrario degli effetti benefici riscontrati in condizioni invecchiate, avvalorando l’ipotesi della minor suscettibilità all’invecchiamento. Tuttavia, l’energia di frattura risulta essere drasticamente peggiorata nel caso delle bio-miscele non invecchiate, mentre risultati più confrontabili sono visibili in seguito all’invecchiamento.

A valle di tale sperimentazione, è emerso che la sostituzione parziale di bitume con lignina risulta essere un’ipotesi percorribile nell’ottica di ridurre l’impiego di bitume per la produzione di conglomerati bituminosi. Tuttavia, ulteriori indagini sperimentali sono fortemente consigliate in modo da approfondire la conoscenza della risposta meccanica offerta dai materiali investigati. In particolare, la realizzazione di un campo prova potrebbe restituire informazioni importanti nell’ottica di una ipotetica futura produzione e applicazione di tali bio-leganti su larga scala.

“La rivoluzione industriale ci offre la speranza di poter raggiungere una nuova era sostenibile post carbonio, evitando la catastrofe del cambiamento climatico. Disponiamo delle conoscenze scientifiche e tecnologiche, e delle linee guida per renderlo possibile. Ora la questione è essere disposti a riconoscere le opportunità economiche che ci attendono e trovare la determinazione per coglierle in tempo.” Jeremy Rinfkin

Bibliografia

- [1] Gaudenzi E., Lu, X., Cardone, F., & Canestrari, F. (2021). **Performance Assessment of Asphalt Mixture Produced with a Bio-Based Binder**. *MDPI* 14040918.
- [2] Arafat, S., Kumar, N., Wasiuddin, N. M., Owhe, E. O., & Lynam, J. G. (2019). **Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties**. *Journal of Cleaner Production*, *217*, 456-468.
- [3] Chi Xu, Duanyi Wang, Shaowei Zhang, Enbei Guo, Haoyang Luo, Zeyu Zhang & Huayang Yu (2021). **Effect of Lignin Modifier on Engineering Performance of Bituminous Binder and Mixture**. *MDPI* 13071083
- [4] Pérez, I. P., Pasandín, A. M. R., Pais, J. C., & Pereira, P. A. A. (2019). **Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures**. *Journal of Cleaner Production*, *220*, 87-98.
- [5] Eyram Norgbey, Jingyu Huang, Volker Hirsch, Wen Jie Liu, Meng Wang, Oliver Ripke , Yiping Li, Georgina Esi Takyi Annan, David Ewusi-Mensah, Xiaohui Wang, Gabriela Treib, Adrian Rink, Amechi S. Nwankwegu, Prince Atta Opoku, Philip Nti Nkrumah (2020). **Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads**. *Construction and Building Materials*, *230*, 116957.
- [6] Yu Zhang, Xuancang Wang, Guanyu Ji, Zhenyang Fan, Yuchen Guo, Wenze Gao, Lei Xin (2020). **"Mechanical performance characterization of lignin-modified asphalt mixture"**. *MDPI* 10093324.
- [7] S. Arafat, N. Kumar, N. M. Wasiuddin, E. O. Owhe, and J. G. Lynam, **"Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties,"** J. Clean. Prod., vol. 217, pp. 456–468, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.238.

- [8] S. Ren et al., **"Multi-scale characterization of lignin modified bitumen using experimental and molecular dynamics simulation methods,"** Constr. Build. Mater., vol. 287, p. 123058, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123058.
- ANAS, Gruppo FS Italiane - I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture – Vol.V (2019).
- Capitolato Speciale d'Appalto, ANAS S.p.a.
- F.A. Santagata – Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.I: Progettazione (2016).
- UNI EN 12697-26:2018 Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 26: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi.
- UNI EN 12697-44:2010 Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 44: Propagazione della fessura mediante prova di flessione semicircolare.