



# 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*

**Caratterizzazione meccanica di miscele bituminose prodotte con bio-leganti  
contenenti lignina**

**Mechanical characterization of asphalt mixtures produced with bio-binders  
containing lignin**

*Relatore:*

**Prof. Ing. Fabrizio Cardone**

*Tesi di laurea di:*

**Brandon Junior  
Ramirez Ambia**

---

Anno accademico 2020/2021



# Sommario

Introduzione .....	4
Conglomerati bituminosi per applicazioni stradali .....	6
1.1 Pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso .....	6
1.2 Aggregati lapidei .....	9
1.3 Leganti bituminosi .....	12
1.4 Bio-leganti .....	16
Stato dell'arte .....	18
2.1 Bio-materiali nelle applicazioni stradali .....	18
2.2 La lignina come bio-legante .....	19
2.3 Impiego della lignina in letteratura .....	22
Indagine sperimentale .....	25
3.1 Inquadramento del progetto .....	25
3.2 Materiali .....	26
3.2.1 Aggregati .....	26
3.2.2 Bitumi .....	30
3.2.3 Lignina .....	32
3.3 Apparecchiature e metodi .....	34
3.3.1 Vagliatura meccanica .....	34
3.3.2 Estrattore .....	36
3.3.3 Miscelatore Ross .....	39
3.3.4 Miscelatore Infratest .....	41
3.3.5 Pressa giratoria Pine .....	43
3.3.6 Caratterizzazione volumetrica .....	47
3.3.7 Prova a trazione indiretta (ITS) .....	51
3.4 Programma sperimentale .....	54
3.4.1 Caratterizzazione meccanica dei conglomerati bituminosi .....	54
Analisi dei risultati .....	60
4.1 Studio del mix design .....	60
4.2 Caratterizzazione meccanica .....	69
Conclusioni.....	73
References .....	75
Bibliografia e sitografia .....	77

# Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni, nel settore delle strutture di trasporto, per via della crescente domanda nelle costruzioni e manutenzioni delle reti stradali, fa sì che ogni anno i governi nazionali si vedano obbligati a investire le risorse naturali nonché i combustibili fossili, come petrolio e suoi derivati (bitume), comportando una diminuzione di tali risorse nel tempo con conseguenti problemi di natura ambientale ed economica.

Nell'ambito dell'ingegneria civile il bitume è un materiale di notevole importanza per la realizzazione di pavimentazioni stradali flessibili in quanto viene utilizzato come legante tra gli aggregati, pertanto, per garantire la salvaguardia e la rigenerazione di tali risorse, la ricerca scientifica si sta orientando verso l'idea di una sostituzione parziale, e nel futuro totale, del legante bituminoso con l'utilizzo di risorse rinnovabili (estratti da biomassa o da rifiuti organici) al fine di ottenere i bio-leganti (o bio-binder in inglese). Questa scelta contribuisce notevolmente all'economia circolare ma soprattutto promuove la riduzione dell'impatto ambientale riducendo le emissioni di  $CO_2$  durante le varie fasi di lavorazione del petrolio, riducendo le concentrazioni dei gas serra nell'atmosfera e abbracciando l'ecosostenibilità senza incidere sulle prestazioni complessive della miscela.

Il lavoro svolto nella presente Tesi di Laurea rivolge particolare attenzione alla lignina, secondo biopolimero più abbondante sulla terra, ottenuto come sottoprodotto dell'industria della pasta di cellulosa, della carta e dei processi agricoli. Tale biopolimero rappresenta una risorsa rinnovabile a tutti gli effetti poiché è sempre reperibile e non esauribile; inoltre, presenta una composizione chimica molto simile al legante bituminoso, il che lo rende un potenziale modificatore e un valido sostituto rinnovabile per il suddetto legante.

Dunque, nella presente indagine sperimentale è stata studiata la possibilità di sostituire parzialmente il legante bituminoso (o bitume) al fine di produrre miscele bituminose prodotte con bio-leganti contenenti lignina. Nello specifico sono stati studiati due bio-leganti a partire da due leganti bituminosi di diversa consistenza (bitume 70/100 e bitume 100/150), i quali sono stati sostituiti parzialmente con due diverse lignine. I bio-leganti prodotti dovranno presentare caratteristiche prestazionali, determinate per mezzo di prove di laboratorio, confrontabili con quelle di un legante bituminoso di riferimento (bitume 50/70) maggiormente utilizzato nelle nostre latitudini per la realizzazione delle pavimentazioni stradali flessibili.

Per tale motivo, gli obiettivi da raggiungere nella presente ricerca si possono esprimere in:

- Ottimizzazione del mix design di miscele in conglomerato bituminoso a caldo per la realizzazione di uno strato di binder contenente bio-legante e RAP;
- Confronto in termini prestazionali dei conglomerati bituminosi prodotti con i bio-leganti contenenti lignina rispetto alla miscela di riferimento.

Inoltre, l'obiettivo principale di questa ricerca è l'ottimizzazione del mix design di miscele in conglomerato bituminoso a caldo per la realizzazione di uno strato di binder contenente bio-legante e RAP.

Il presente elaborato è strutturato in quattro capitoli oltre all'introduzione e alle conclusioni:

- CAPITOLO 1: “Conglomerati bituminosi per applicazioni stradali”, nel quale si descrive l'impiego dei conglomerati bituminosi in ambito stradale e i materiali impiegati per la sua realizzazione: aggregati lapidei, legante bituminoso e bio-leganti;
- CAPITOLO 2: “Stato dell'arte”, nel quale viene descritto il biopolimero impiegato nella presente indagine sperimentale, in diversi aspetti, con riferimento a trattati scientifici;
- CAPITOLO 3: “Indagine sperimentale”, nel quale vengono descritti i materiali impiegati, le apparecchiature, i metodi utilizzati e l'indagine sperimentale;
- CAPITOLO 4: “Analisi dei risultati”, nel quale vengono presentati e discussi i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui conglomerati bituminosi.

## Capitolo 1

# Conglomerato bituminoso per applicazioni stradali

### 1.1 Pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso

Con il termine conglomerato bituminoso si intende un materiale composito ottenuto dalla miscelazione, in proporzioni accurate, di aggregati lapidei (materiali di natura calcarea o silicea), legante bituminoso, filler ed eventuali additivi (agenti modificanti che alterano la struttura chimico-fisica, con conseguente variazione delle proprietà reologiche, migliorando complessivamente le prestazioni del materiale) generalmente confezionato a caldo in specifici impianti.

Le principali caratteristiche che il conglomerato bituminoso deve soddisfare sono:

- Elevata portanza (capacità di sopportare ai carichi veicolari);
- Elevata durabilità (capacità di resistere a fenomeni degradanti, quali agenti atmosferici e usura da utilizzo);
- Regolarità e uniformità;
- Elevata aderenza pneumatico-piano di rotolamento;
- Costi ridotti.

Il conglomerato bituminoso viene utilizzato per le diverse sovrastrutture stradali come le pavimentazioni stradali (sovrastruttura interessata dal moto dei veicoli, atta a garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di comfort e sicurezza, rispettando sia requisiti strutturali che funzionali), le quali si differenziano per il diverso meccanismo di trasferimento dei carichi superficiali sul piano di posa, per le caratteristiche dei materiali costituenti e per lo spessore degli strati. Le pavimentazioni stradali sono di tre tipologie:

- Flessibili;
- Semi-rigide;
- Rigide.

In generale le pavimentazioni stradali sono costituite da più strati sovrapposti costituiti da materiali di caratteristiche fisiche e meccaniche diverse in cui ciascuno assolve funzioni diverse, i quali possono differire sia in funzione della tipologia costruttiva all'interno della struttura che in funzione al tipo di sollecitazione prevalente a cui sono sottoposti dai carichi di traffico.

In particolare, nel presente lavoro di Tesi, l'attenzione è ricaduta sulle pavimentazioni flessibili generalmente costituite da due o tre strati di conglomerato bituminoso (a seconda dell'importanza della strada) e da una fondazione in misto granulare, eventualmente stabilizzata con inerti o con leganti (soluzione adottata in ambito autostradale), la quale si appoggia sul terreno naturale o sottofondo.

Gli strati costituenti, come mostra la Figura 1.1, sono:

- *Tappeto o manto d'usura*: strato superiore, costituito da conglomerato bituminoso e inerti di pezzatura media, con la funzionalità di favorire lo smaltimento delle acque meteoriche, limitare il rumore di rotolamento, resistere all'abrasione e usura e di fungere come superficie regolare;
- *Binder o strato di collegamento*: strato intermedio che collega il tappeto d'usura con lo strato di base;
- *Strato di base*: ultimo strato prima della fondazione, garantisce una buona resistenza ai carichi verticali ed un'elevata rigidità in un ampio intervallo di temperatura;
- *Strato di fondazione*: diffonde al terreno naturale sottostante i carichi agenti sul corpo stradale, è realizzato in misto granulare o misto cementato.

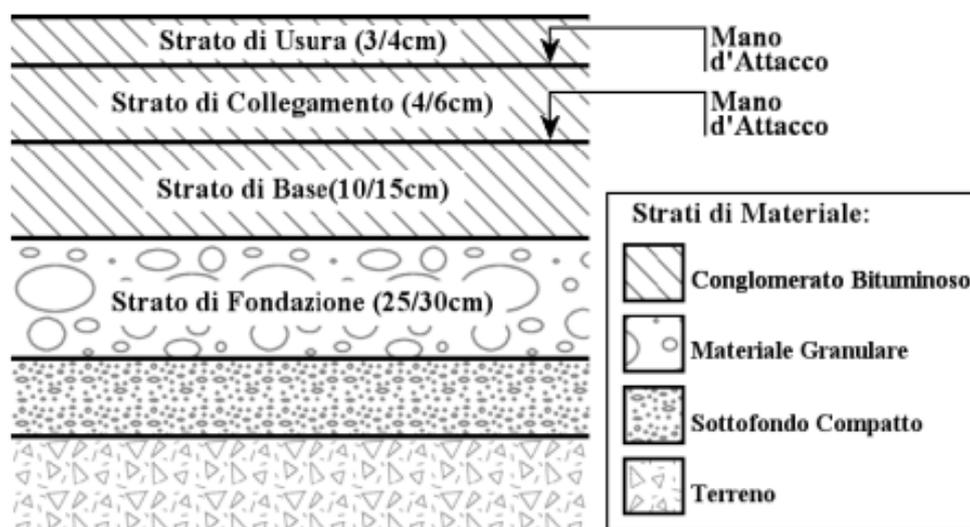


Figura 1.1. Sezione di una pavimentazione flessibile

Questa tipologia di pavimentazione è la più diffusa in ambito stradale (circa l'80%) per diverse ragioni: permette una graduale distribuzione dei carichi al piano di sottofondo rispetto alle altre due tipologie, costi ridotti di costruzione e manutenzione, rapidità di interventi di manutenzione, tecnologia di costruzione non complessa, ecc.

Inoltre, presenta un meccanismo di resistenza basato sul concetto di flessibilità dove la pavimentazione deve essere in grado di resistere ai carichi senza deformarsi né fessurarsi e 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 dove viene impiegato il conglomerato bituminoso.

Come spiegato precedentemente, il conglomerato bituminoso viene adoperato per la realizzazione di miscele in conglomerato bituminoso, le quali possono essere ulteriormente classificate in funzione delle caratteristiche volumetriche:

- Aperte (o drenanti) con una percentuale di vuoti tra il 16-27%;
- Chiuse con una percentuale di vuoti tra il 3-8%.

Le prime vengono utilizzate negli strati d'usura per consentire lo smaltimento delle acque meteoriche accumulate in superficie con vantaggi in termini di sicurezza per il transito dei veicoli.

Il tenore dei vuoti è un parametro fondamentale che permette di avere un'idea sulle caratteristiche meccaniche della miscela, ad esempio, al diminuire della percentuale di vuoti si ottengono generalmente caratteristiche meccaniche superiori dovute al miglior incastro tra i granuli (più punti di contatto) garantendo una maggior stabilità.

Il tappeto o manto d'usura della pavimentazione stradale deve garantire regolarità e aderenza, tra le ruote dei veicoli e la pavimentazione stessa, in modo da assicurare il transito dei veicoli in condizioni ottimali di comfort e sicurezza sia nel caso di pavimentazione asciutta che bagnata. A tal fine il manto d'usura deve garantire un'elevata rugosità superficiale.

Infine, nel conglomerato bituminoso, l'accurata progettazione e dosaggio (studio di miscela o mix design) dei componenti come l'assortimento granulometrico ed il contenuto di legante bituminoso, oltre alle sue caratteristiche permettono un'elevata durabilità e prestazione della pavimentazione in grado di supportare al meglio il carico del traffico veicolare in esercizio senza essere soggetto a deformazioni permanenti e ammaloramenti come le fessurazioni; tali componenti verranno spiegati più nel dettaglio in seguito.

## 1.2 Aggregati lapidei

Gli aggregati lapidei sono componenti naturali di origine minerale che, miscelati e legati in dosi opportune, costituiscono lo scheletro di tutti gli strati che compongono la sovrastruttura stradale, sia quelli superficiali in conglomerato bituminoso che quelli profondi delle fondazioni.

Rappresentano l'80-85% del volume delle miscele e si classificano in categorie diverse soprattutto per l'origine:

- *Naturale*: elementi di origine minerale ricavati, mediante estrazione da cava di prestito o altri depositi di natura alluvionale, mediante l'utilizzo di mezzi meccanici o mediante esplosivi. Il materiale viene trasportato all'impianto di frantumazione dove avverrà il processo di frantumazione attraverso tecnologie diverse (frantumazione a pressione lenta, a pressione con urto, a percussione, a taglio, a sfregamento). Tale processo è di grande importanza per gli aggregati da impiegare nelle sovrastrutture stradali perché, oltre ad ottenere le dimensioni corrispondenti alle diverse classi granulometriche, permette di avere elementi lapidei caratterizzati da spigoli vivi e superfici rugose che garantiscono un maggior apporto di attrito tra gli aggregati stessi garantendo elevate caratteristiche di rigidità e resistenza meccanica. Si parlerà di un processo di frantumazione per via secca o umida a seconda dell'utilizzo o meno di acqua. Successivamente il materiale frantumato viene vagliato, attraverso una serie di crivelli con fori circolari o setacci a maglie quadrate, separato nelle diverse classi e stoccato in cumuli;
- *Artificiale*: elementi ricavati da processi industriali, progettati e prodotti su misura, come le scorie legate alla lavorazione del ferro, acciaio e nickel;
- *Da riciclo*: elementi derivanti da costruzioni preesistenti, demolizioni edilizie (macerie, C&D) e rifiuti di varia natura. Grande attenzione viene rivolta ai materiali ottenuti dalla fresatura degli strati ammalorati di pavimentazioni esistenti (Reclaimed Asphalt Pavement RAP). Tali materiali da riciclo, grazie alle nuove tecnologie, sono sempre più in diffusione in ambito stradale con grande vantaggio in termini di tematica ambientale.

Le caratteristiche fondamentali, in ambito stradale che gli aggregati devono possedere, si classificano in funzione delle caratteristiche geometriche e dimensioni degli aggregati, come mostra la Figura 1.2. Devono essere descritti attraverso un intervallo nominale compreso tra due dimensioni caratteristiche ( $d/D$ ), dove “d” indica il diametro minimo dell’aggregato e “D” il diametro massimo, ottenendo diverse classi. Tanto più è stretto l’intervallo tanto più la classe può definirsi uniforme.

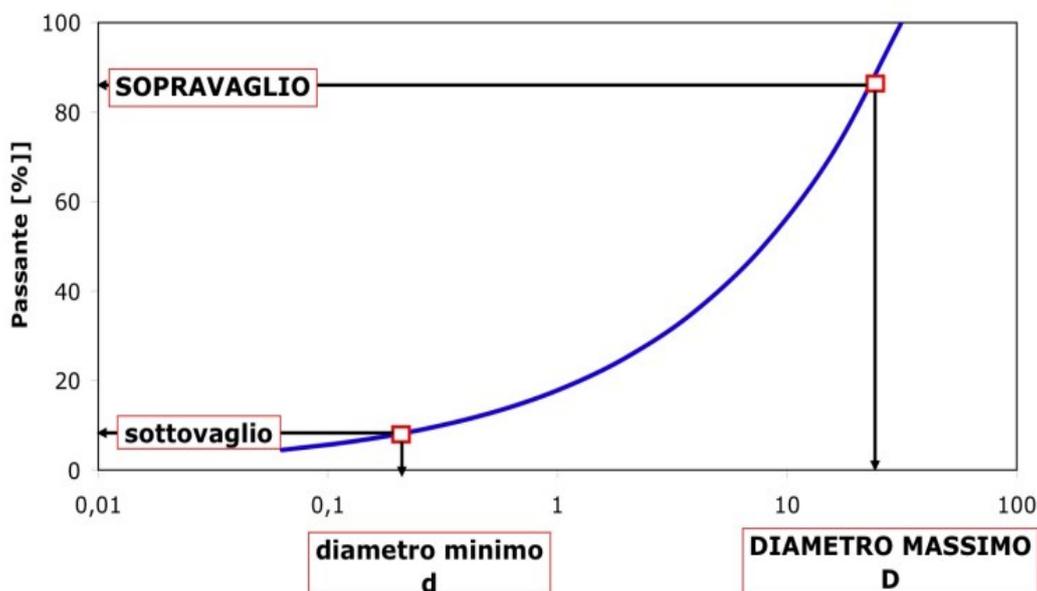


Figura 2.2. Rappresentazione del diametro massimo e minimo in funzione del passante in percentuale

La dimensione massima “D” non deve essere né troppo piccolo, altrimenti non si sviluppa un adeguato attrito interno, né troppo grande, altrimenti le miscele tendono ad essere poco lavorabili cioè difficili da compattare. Il rapporto  $d/D$  deve essere superiore a 1,4.

Come indica la normativa UNI EN 13043 gli aggregati possono essere distinti in:

- Grossi se  $D \geq 4$  mm e  $d \geq 1$  mm;
- Fini se  $D \leq 4$  mm e  $d = 0$ ;
- Filler: la frazione passante al setaccio 0,063 mm.

Tale frazione varia leggermente tra le diverse norme, ad esempio, la norma UNI EN 13242 designa come filler gli aggregati con  $D \leq 6,3$  mm; inoltre, è importante per i conglomerati bituminosi poiché rappresenta un additivo minerale, dunque, il controllo del dosaggio e della composizione devono essere effettuati con attenzione. In effetti, il mastice filler e bitume controlla molte proprietà delle miscele come: il trasudamento, lo spogliamento e la stabilità delle miscele.

### ***Forma e tessitura superficiale***

Gli inerti possono avere forme diverse: poliedrica, allungata, piatta, arrotondata, spigolosa. Affinché vi siano superfici di contatto ben distribuite e un maggiore attrito interno, determinando così un'alta lavorabilità, la forma dei granuli deve essere poliedrica e spigolosa evitando gli elementi allungati e piatti. In termini di tessitura superficiale, le particelle rugose producono miscele con maggiore attrito interno cioè maggiore stabilità, garantiscono maggiore aderenza in particolare negli strati superficiali e nei conglomerati bituminosi formano con il bitume dei legami più forti e durevoli.

Il grado di regolarità (grado di poliedricità) del singolo elemento lapideo può essere determinato attraverso l'indice di forma o Shape Index (SI), come indica la normativa UNI EN 933-3. Indicando con S ed L rispettivamente le dimensioni minime e massime, possiamo classificare l'elemento non regolare (o non cubico) quando  $L/S > 3$ .

### ***Caratteristiche chimiche***

La caratterizzazione chimica dipende dalla composizione chimica di cui l'aggregato è composto e permette di definire il grado di stabilità e le interazioni che si instaurano con il legante bituminoso. A tal proposito, un aspetto fondamentale è il grado di adesione tra aggregato e bitume; vi sarà una scarsa affinità chimica tra le due componenti al manifestarsi di fenomeni di spogliamento (in presenza d'acqua) o in presenza di contaminanti organici. Quest'adesione è più solida se si utilizzano aggregati calcarei, aventi maggiore affinità al bitume (idrofobi), piuttosto che aggregati silicei aventi maggiore affinità all'acqua (idrofilo).

I primi instaurano un forte legame di tipo chimico, e quindi un'elevata adesione, anche in presenza di acqua; mentre i secondi sono più soggetti a degrado (spogliamento, stripping) e per migliorare l'adesione aggregato-bitume occorre l'utilizzo di additivi come ad esempio filler calcarei.

La resistenza allo spogliamento viene espressa in percentuale della superficie non ricoperta dal bitume:  $\text{Stripping (\%)} = 100\% - \text{superficie coperta da bitume (\%)}$ .

### ***Caratteristiche fisico-meccaniche***

Per gli elementi lapidei la massa volumica (detta anche densità) è essenziale per il calcolo delle caratteristiche volumetriche delle miscele. La normativa UNI EN 1097-6 indica la procedura per determinare le varie masse volumiche sia per gli aggregati grossi che per quelli fini.

Per una facile comprensione delle espressioni che rappresentano le masse volumiche, si indica con  $V_n$  la somma dei volumi di ciascun granulo escluse le piccole cavità (pori), che permettono l'ingresso dell'acqua, con  $V_B$  il volume effettivo cioè il volume che tiene conto sia del granulo che dei pori, con

$M_S$  la massa secca degli aggregati e con  $M_{SSD}$  la massa satura degli aggregati a superficie asciutta.

Dunque, le masse volumiche si distinguono in:

- Massa volumica apparente:  $\rho_a = \frac{M_S}{V_n}$ ;
- Massa volumica effettiva:  $\rho_{eff} = \frac{M_S}{V_B}$ ;
- Massa volumica satura a superficie secca:  $\rho_{sat} = \frac{M_{SSD}}{V_B}$ ;
- Assorbimento d'acqua (%):  $\rho_{ass} = 100 \times \frac{M_{SSD} - M_S}{V_B}$ .

La caratterizzazione meccanica in termini di resistenza a frammentazione, abrasione, urto e levigazione può essere determinata attraverso apparecchiature di laboratorio come:

- Los Angeles (UNI EN 1097-2);
- Micro-Deval (UNI EN 1097-1);
- Prova di attrito radente o prova CPA (UNI EN 1097-8).

Inoltre, gli aggregati devono resistere agli effetti combinati di temperatura e umidità. Per lo studio e il controllo di questi fenomeni le prove utilizzate sono:

- Resistenza ai cicli gelo/disgelo (UNI EN 1367-1);
- Prova al solfato di magnesio (UNI EN 1367-2).

### 1.3 Leganti bituminosi

Il legante bituminoso (o bitume) è un composto di natura organica eterogenea derivato dal processo di distillazione del petrolio greggio o esistere allo stato naturale, in grado di conferire coesione a un ammasso di aggregati sciolti per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e di flessione dovute ai carichi veicolari superficiali.

La norma UNI EN 1259-7 definisce i termini per bitumi di vari tipi e per leganti derivati dal bitume, il bitume è un *“materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell’asfalto nativo; completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente”*.

Come già enunciato, il bitume deriva dai processi di raffinazione del petrolio grezzo. Il processo più comune è quello della distillazione frazionata nel quale vengono separate le fasi del greggio di petrolio attraverso diverse temperature di ebollizione e di condensazione dei suoi vari componenti. A seconda del tipo di greggio di petrolio si avranno differenze sia nella quantità che nella qualità del bitume.

Il bitume, dunque, rappresenta la componente legante dei conglomerati bituminosi, ovvero è il responsabile delle caratteristiche di adesione e coesione tra le particelle di aggregato garantendo consistenza e stabilità sotto carico, inoltre, esso è presente in minor quantità all'interno del conglomerato (circa 5% in peso rispetto agli aggregati).

Una proprietà importante del bitume è il diverso comportamento al variare della temperatura (termo-dipendenza); questo comportamento spazia da un solido elastico per bassi valori di temperatura a quello di un fluido di tipo Newtoniano per alti valori di temperatura con stadi intermedi di tipo visco-elastico. Infatti, si possono avere materiali di tipo semi-liquido (facilmente lavorabili) alle temperature di miscelazione e compattazione e materiali di tipo semi-solido alle temperature di esercizio. Occorre considerare che la dipendenza dalla temperatura permane anche all'interno del range delle temperature di esercizio determinando così un diverso comportamento del materiale a condizioni climatiche diverse.

La termo-dipendenza è una caratteristica importante da considerare durante la vita di esercizio di una pavimentazione stradale in conglomerato bituminoso quando è sottoposto a condizioni climatiche differenti. Essa è influenzata anche dalla viscosità, la quale rende il materiale tempo-dipendente ovvero il suo comportamento risente del tempo di applicazione della sollecitazione, ad esempio la velocità con cui transitano i veicoli. Dunque, si deve prestare particolare attenzione alla scelta del legante idoneo a seconda delle condizioni ambientali e di carico cui la pavimentazione è soggetta nell'arco della propria vita utile.

Per comprendere meglio le proprietà meccaniche e fisiche del bitume si fa riferimento a un modello proposto da Nellensteyn dove il bitume può essere rappresentato come un sistema colloidale costituito da una dispersione di sostanze insolubili (dette asfaltene) in un mezzo oleoso di base (malteni) costituito da componenti aromatici e saturi (Figura 1.3).

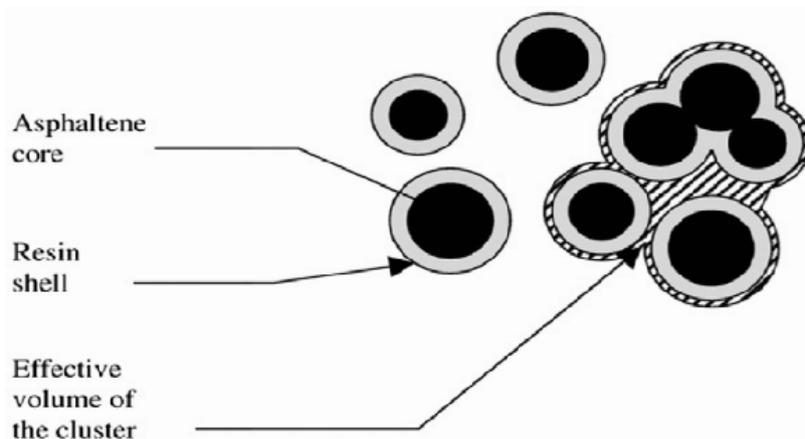


Figura 1.3. Rappresentazione del sistema colloidale del bitume

Gli asfaltini sono strutture complesse che determinano il comportamento del bitume al variare della temperatura (viscoso, elastico, plastico) e la resistenza alle sollecitazioni meccaniche. I saturi e aromatici sono sostanze chimiche che costituiscono il componente più fluido del bitume influenzando sul suo comportamento ad elevate temperature conferendogli la capacità di ricoprire estese superfici di altro materiale. Le resine sono composti solubili, viscosi a temperatura ambiente e con notevoli proprietà adesive; svolgono un'azione disperdente degli asfaltini conferendo flessibilità e duttilità al bitume quando esso è soggetto a sollecitazioni. Il rapporto tra asfaltini, malteni e resine (ovvero lo stato di aggregazione delle miscele) determina il comportamento reologico del bitume. Tornando al modello colloidale, il comportamento del bitume può variare tra un sistema “sol” (le particelle solide o micelle tendono a disperdersi all'interni della soluzione oleosa senza interagire tra loro) prettamente Newtoniano e un sistema “gel” non Newtoniano (le particelle solide o micelle tendono ad aggregarsi e reticolare all'interno della soluzione oleosa).

Un'osservazione importante da fare è che i costituenti del bitume variano nel tempo a seguito dell'interazione chimica tra bitume e ossigeno; questo fenomeno di ossidazione comporta un “invecchiamento” del bitume. Si parlerà di invecchiamento a “breve termine” quando il legante bituminoso è esposto ad elevatissime temperature durante le fasi di miscelazione, compattazione, trasporto e posa in opera (superiori ai 130°C). Mentre si parlerà di invecchiamento a “lungo termine” il fenomeno, durante tutto l'arco di vita della pavimentazione, dovuto all'esposizione del materiale agli agenti atmosferici (irraggiamento solare, acqua, vento). In entrambi i casi, il bitume subisce fenomeni di ossidazione che comporta la perdita delle componenti volatili più leggere (malteni) con un progressivo incremento di asfaltini (componente più dura e resistente); come conseguenza si ha un notevole incremento in termini di rigidità diventando più fragile ed esposto maggiormente al fenomeno di fessurazione.

L'aspetto dell'invecchiamento rappresenta una peculiarità rispetto all'uso di materiale recuperato da vecchie pavimentazioni (Fresato) per il confezionamento di nuovo conglomerato bituminoso tramite tecnica di riciclaggio a caldo dove parte del legante tende a riattivarsi e a miscelarsi con gli aggregati vergini e con il bitume di aggiunta. Questo bitume “riattivato” presenta tutte le caratteristiche dei processi di invecchiamento ovvero caratteristiche alterate rispetto a quelle iniziali, dunque, la miscela finale riciclata di bitume vergine e bitume invecchiato avrà caratteristiche intermedie e tenderà ad essere più rigida e fragile di un'equivalente miscela composta unicamente da materiale vergine. A tale scopo, la scelta del bitume vergine di aggiunta dovrà presentare specifiche caratteristiche per compensare almeno parzialmente l'effetto irrigidente del bitume riattivato oltre che l'utilizzo di specifici additivi che mirano a ripristinare le caratteristiche del bitume invecchiato.

Dunque, un legante bituminoso per essere chiamato ottimale deve garantire una consistenza costante e sufficientemente elevata in tutto il range delle temperature di esercizio cui è sottoposta la pavimentazione nell'arco della propria vita utile. I bitumi definiti "tal quale" non corrispondono a quelli ottimali poiché il loro comportamento cambia al variare della temperatura per tale ragione le miscele che impiegano bitumi tal quale sono più soggette a fenomeni di fessurazione. A tale scopo per migliorare le prestazioni del conglomerato, conferendogli un comportamento che non si discosti molto da quello ideale, si ricorre all'utilizzo di agenti modificanti i quali alterano, in maniera irreversibile, la composizione chimico-fisica con un miglioramento complessivo delle caratteristiche prestazionali in modo da ottenere il cosiddetto bitume modificato (Figura 1.4.).

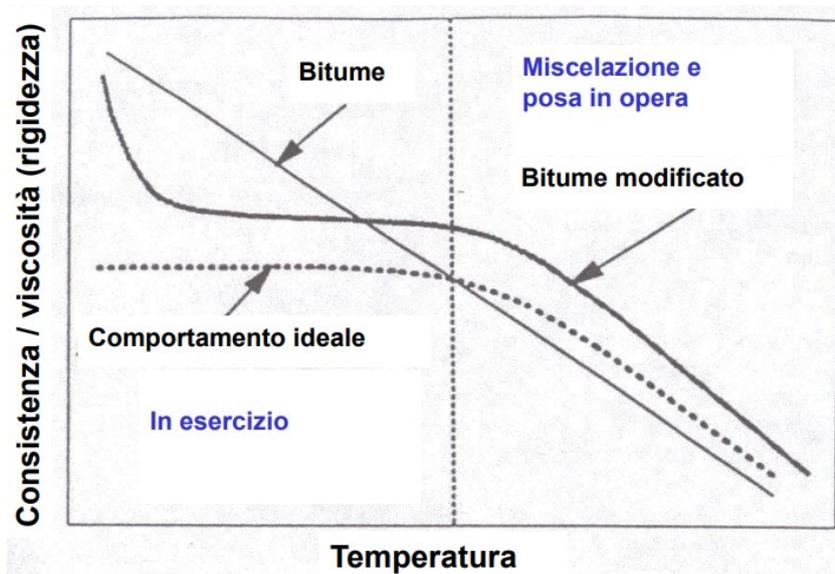


Figura 1.4. Comportamento del bitume ideale, tradizionale e modificato

Gli agenti modificanti sono nella gran parte materiali polimerici termoplastici come plastomeri ed elastomeri. I primi non modificano in maniera significativa la risposta elastica del bitume ma ne determinano un sostanziale incremento della resistenza a rottura. I principali plastomeri sono:

- EVA (etilene-vinilacetato);
- EBA (etilene-butilacrilato);
- EMA (etilene-metilacrilato);
- EPDM (etilene-propilene diene);
- Poliolefine: PE (polietilene) e PP (polipropilene).

Gli elastomeri, invece, migliorano prevalentemente il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici. I principali elastomeri sintetici sono:

- SBS (stirene-butadiene-stirene);
- SIS (stirene-isoprene-stirene);
- SB (stirene-butadiene);
- SBR (stirene-butadiene rubber).

Inoltre, in funzione alla percentuale di polimero all'interno del bitume si possono distinguere tre livelli di modifica:

- 1) Soft: se l'aggiunta di polimero è pari all'1,8%;
- 2) Medium: se l'aggiunta di polimero è pari al 2,8%;
- 3) Hard: se l'aggiunta di polimero è pari al 3,8%.

I bitumi modificati vengono utilizzati laddove sono richieste particolari caratteristiche in termini di resistenza meccanica e adesione dove la pavimentazione stradale è sottoposta ad un elevato traffico veicolare ad esempio nelle applicazioni industriali o stradali come piste automobilistiche, aeroporti o autostrade.

## **1.4 Bio-leganti**

Come già stato precedentemente annunciato nell'introduzione di questo lavoro di Tesi, le costruzioni e manutenzioni delle pavimentazioni stradali e aeroportuali fanno sì che il bitume, la maggior parte del quale derivato da combustibile fossile, sia fortemente impiegato.

Al fine di salvaguardare e promuovere la rigenerazione di tale risorsa, negli ultimi decenni, molti ricercatori in ambito stradale continuano a lavorare alla formulazione di leganti alternativi, detti bio-leganti o bio-bitumi (in inglese noti come bio-binders), che possano sostituire almeno parzialmente la forte domanda di legante bituminoso. Tali bio-leganti, derivanti da materia organica rinnovabile, sono essenziali per la sostituzione dei materiali a base di petrolio incentivando fortemente l'economia circolare, promuovendo l'ecosostenibilità e minimizzando l'impatto ambientale ma senza incidere sulle prestazioni complessive della miscela.

Alcuni bio-leganti studiati nel corso del tempo, per la sostituzione totale, prodotti dalla combinazione di una resina, un olio viscoso (naturale o vegetale) ed eventuali polimeri non hanno trovato sviluppo per via della presenza di olio commestibile. Invece, nell'ultimo decennio, ha trovato forte interesse scientifico l'estrazione di lipidi da microalghe poiché non compete con l'alimentazione umana.

In termini di sostituzione parziale, invece, spiccano i cosiddetti bio-oli (generalmente derivanti dagli scarti di oli vegetali o dalla lavorazione del letame suino) e la lignina (sottoprodotto dell'industria della pasta di cellulosa, della carta e dei processi agricoli).

Quest'ultima presenta una struttura chimica, a base di combustibili fossili, molto simile al legante bituminoso, rendendola così un valido sostituto rinnovabile e un potenziale modificatore del bitume. In base alla fonte di origine e alla tecnica di produzione si avranno diversi tipi di lignina, le quali differiscono le une dalle altre per il colore, odore e per le proprietà modificanti all'interno del conglomerato bituminoso.

L'utilizzo di questi bio-leganti, affinché possano essere idonei come sostituti del legante bituminoso, devono possedere caratteristiche e proprietà affini che devono essere confrontate con quelle del legante di riferimento mediante indagini sperimentali e approfondimenti.

## Capitolo 2

# Stato dell'arte

### 2.1 Bio-materiali nelle applicazioni stradali

Negli ultimi decenni, i settori industriali si stanno maggiormente focalizzando sullo sviluppo e sulla persecuzione di alcuni principi fondamentali come la sostenibilità e l'economia circolare. Più precisamente nel campo dell'ingegneria delle infrastrutture dei trasporti, nell'ottica della sostenibilità ambientale, i ricercatori si stanno orientando alla formulazione e allo studio di bio-leganti contenenti residui industriali e sottoprodotti derivanti da materiali di fonti rinnovabili (bio-materiali).

Gli obiettivi mirano a una sostituzione totale o parziale del legante bituminoso, derivante dal petrolio (fonte fossile di origine non rinnovabile), mediante i bio-leganti con una conseguente riduzione della domanda di bitume nonché una ridotta necessità di discariche e costi di smaltimento ma soprattutto con un minor impatto ambientale in termini di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e riduzione delle concentrazioni dei gas serra nell'atmosfera.

In generale, si può fare un'ampia distinzione tra bio-materiali solidi e liquidi, impiegati nei bio-leganti, in quanto è stato dimostrato che la loro aggiunta nei leganti bituminosi fornisce diversi effetti in termini di prestazione. [1]

Esempi di bio-materiali solidi sono le fibre naturali (fibre di carbonio, fibre di vetro, ecc) i quali sono considerati additivi compatibili per modificare le caratteristiche tecniche del conglomerato bituminoso e la lignina (secondo bio-polimero più abbondante sulla terra, utilizzato per rafforzare le proprietà meccaniche e dinamiche delle miscele in conglomerato bituminoso). [2]

I bio-materiali liquidi, invece, possono essere suddivisi in quattro gruppi principali:

- Bio-oli di legno da industria della carta e della pasta di cellulosa;
- Olio da cucina esausto;
- Bio-oli da residui agricoli e biomasse vegetali;
- Bio-oli ottenuti da letame animale.

Quest'ultima tipologia di bio-materiali fornisce un effetto "ammorbidente" che, in termini di prestazioni, porta ad un miglioramento del comportamento alle basse temperature e della resistenza a fatica rispetto al bitume di riferimento nonostante vi sia una maggiore tendenza alle deformazioni [1]. Inoltre, nella maggior parte dei casi, i bio-oli provocano una diminuzione della viscosità del legante bituminoso causata dalla bassa viscosità del bio-olio stesso, provocano anche un aumento del valore del grado di penetrazione e una diminuzione del punto di rammollimento a vantaggio del comportamento del legante alle basse temperature ma a svantaggio alle alte temperature di esercizio [3]. Tuttavia, prima dell'uso di tali bio-materiali è necessario un pretrattamento chimico come la pirolisi veloce, esterificazione o liquefazione idrotermale. [1]

Negli studi fino ad ora pubblicati e presenti in letteratura vi sono numerose tipologie di bio-leganti da impiegare come potenziali sostituti totali e parziali tra cui:

- Sostituti totali:
  - Leganti a base di oli vegetali e sottoprodotti del legno (resine naturali e modificate);
  - Leganti derivanti da microalghe.
- Sostituti parziali:
  - Leganti contenenti lignina;
  - Leganti derivanti da olio di scarto di cucina o oli vegetali;
  - Leganti derivanti dalla lavorazione del letame suino.

I bio-leganti possono essere utilizzati come sostituti del bitume, ed in funzione della percentuale di sostituzione [3] si parlerà di:

- Modificatore di bitume se la sostituzione è inferiore al 10%;
- Estensore del bitume se la sostituzione è compresa tra il 10% e il 75%;
- Legante alternativo se la sostituzione è pari al 100%.

Nella presente indagine sperimentale è stato analizzato l'impiego del bio-polimero lignina come sostituto parziale del legante bituminoso al fine di salvaguardare e permettere la rigenerazione di tale materiale prezioso di origine fossile.

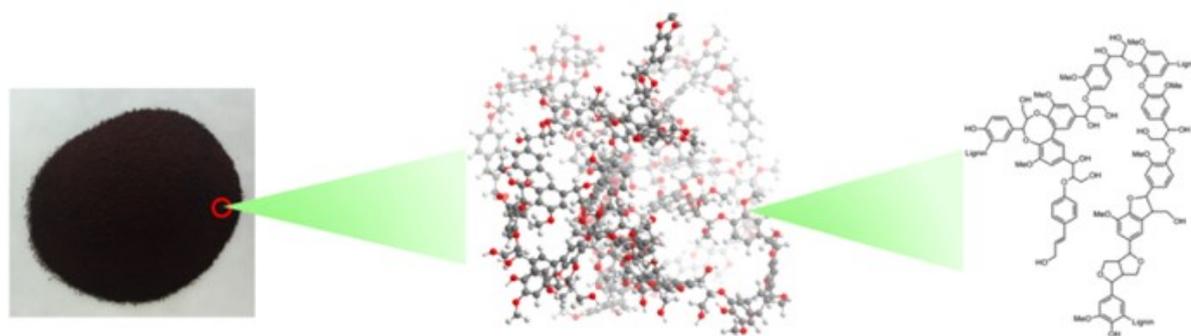
## **2.2 La lignina come bio-legante**

La lignina è un polimero naturale di origine vegetale che, dopo la cellulosa, rappresenta il secondo bio-polimero più abbondante sulla Terra [4]. Essa rappresenta uno dei costituenti principali dei vegetali, che conferisce durezza e durabilità alla pianta; inoltre, può presentarsi in diverse forme come

polvere di lignina o fibra di lignina [5]. La tipologia dipende dalla biomassa da cui deriva, ad esempio, sottoforma di polvere se deriva da operazioni di scarto delle industrie mentre sottoforma di fibra se deriva dai coprodotti del legno ovvero dalle resine derivanti dall'incisione della corteccia degli alberi. Inoltre, più di 50 milioni di tonnellate di lignina di scarto sono generate annualmente dall'industria della cellulosa e della carta ma solo il 2% viene utilizzata per i prodotti biologici [6] mentre il resto di questa viene bruciata per recuperare gli additivi chimici, utilizzato nei processi di estrazione, oppure smaltita in discarica. L'utilizzo di questo eccesso di lignina, come materia prima per i prodotti rinnovabili, offre una significativa opportunità per migliorare l'efficienza operativa, ridurre i costi, ridurre al minimo le emissioni di carbonio e massimizzare la sostenibilità della bioraffineria lignocellulosica [6]. D'altronde è stato dimostrato che la lignina possiede proprietà antiossidanti, antimicotiche e antibiotiche. [7]

Nell'ottica di una sostituzione parziale o totale, il bio-legante deve presentare un comportamento simile a quello del bitume, in modo da avere proprietà meccaniche e una composizione chimica assimilabili. Un valido sostituto rinnovabile e potenziale modificatore, con composizione chimica molto simile al legante fossile, riguarda proprio la lignina ottenuta come sottoprodotto dei processi della pasta di cellulosa, della carta e dei processi agricoli.

Con riferimento alla composizione chimica (Figura 2.1), la lignina può essere descritta come un copolimero eterogeneo avente una struttura complessa irregolare di natura idrofobica, composta di unità di fenil-propano connesse tra di loro da legami carbonio-carbonio creando un effetto tridimensionale nella matrice bituminosa che si traduce in un miglioramento delle prestazioni del bitume a temperature elevate [8] e svolgendo il ruolo di antiossidante nel bitume [9]. La funzione antiossidante viene rispettata se il quantitativo di lignina, come sostitutivo al bitume, è presente in porzioni limitate.



*Figura 2.1. Composizione chimica della lignina*

La biomassa lignocellulosa è costituita da tre componenti interconnessi tra loro (Figura 2.2):

- la cellulosa (40-50%);
- l'emicellulosa (20-30%);
- la lignina (15-30%).

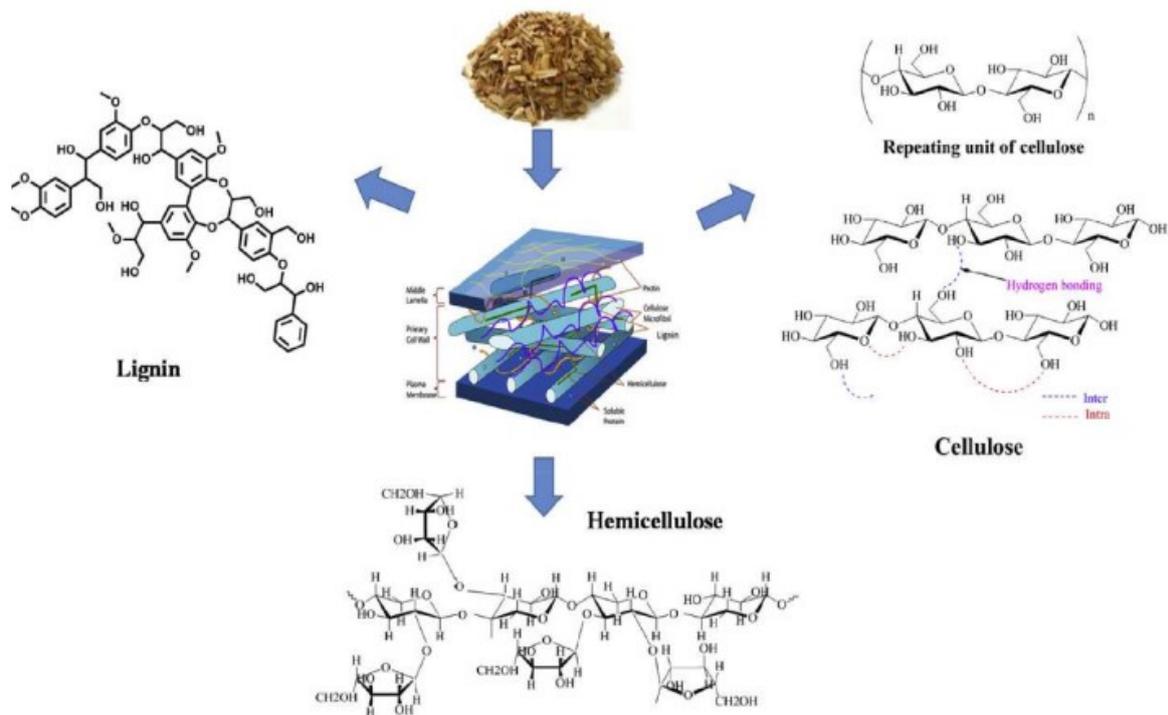


Figura 2.2. Rappresentazione della biomassa lignocellulosa

Inoltre, è importante valorizzare la larghissima disponibilità della lignina poiché si tratta di un prodotto:

- Rinnovabile;
- Molto versatile, in letteratura scientifica si trovano molti studi in diversi aspetti;
- Economico, trattandosi di uno scarto di varia natura;
- Possessore di un alto contenuto energetico, dovuto alla presenza di anelli aromatici;
- Potenziale sostitutivo del bitume, dovuto alla somiglianza da un punto di vista chimico;
- Presente in percentuali elevate in molte specie vegetali.

## 2.3 Impiego della lignina in letteratura

In seguito, verranno riportati alcuni casi di studio presenti in letteratura eseguiti da gruppi di ricerca sull'utilizzo della lignina come bio-legante. Tali ricerche sono state effettuate mediante sostituzione del biopolimero sul bitume in diverse percentuali (riferite al peso) con successivi studi sulle proprietà reologiche. In altre ricerche sono stati prodotti conglomerati bituminosi utilizzando bio-leganti contenenti lignina focalizzandosi sulla caratterizzazione meccanica.

Nello studio condotto da Zarei et al. [4] è stata utilizzata la lignina per migliorare le proprietà del bitume e le prestazioni della miscela in conglomerato bituminoso confezionate con bio-leganti contenenti lignina in varie percentuali (3, 6, 9 e 12%) in peso al bitume di riferimento 60/70. Più precisamente sono stati indagati il grado di penetrazione, il punto di rammollimento, la viscosità, l'indice di permeabilità e il punto di rottura Fraas. La lignina in studio è stata ottenuta dai trattamenti delle acque reflue dell'Iran riducendo notevolmente l'impatto ambientale. I risultati di tale ricerca hanno indicato che la sostituzione della lignina fino al 6%, restituisce una diminuzione del grado di penetrazione, un aumento del punto di rammollimento e della viscosità dinamica del legante. Il punto di rottura Fraas viene ridotto notevolmente se la percentuale di sostituzione di lignina sul bitume supera il 6% (in peso); inoltre, essa riduce l'ossidazione del bitume alle alte temperature. Dunque, è stato desunto che il contenuto ottimale di lignina da sostituire al bitume è del 6% ottenendo ottime proprietà prestazionali e rendendo la miscela vantaggiosa in termini economici.

Gli stessi ricercatori hanno condotto altri studi, nei quali si sono concentrati sulle proprietà meccaniche e dinamiche di miscele in conglomerato bituminoso confezionate con lignina in varie percentuali in peso (3, 6, 9 e 12%) come sostitutivo al bitume. La lignina è stata aggiunta al bitume di riferimento mediante un miscelatore ad alto taglio rotante e successivamente le miscele sono state sottoposte alla prova di fatica. I risultati ottenuti hanno dimostrato che le prestazioni della miscela migliorerebbe utilizzando lignina fino al 6% in peso di bitume; inoltre, all'aumentare della percentuale dell'additivo la sensibilità termica diminuisce. [8]

Un altro studio realizzato dagli stessi autori, per la prima volta, si basa sull'utilizzo di lignina e fibra di vetro (6 e 12 mm) per migliorare le proprietà tecniche e le prestazioni del conglomerato bituminoso. La fibra di vetro, diffondendosi attraverso la miscela di conglomerato, impedisce lo sviluppo delle microfessurazioni producendo un impasto bituminoso più coerente aumentandone, al contempo, la durata. La miscelazione è stata eseguita in modo tale da aggiungere lignina e fibra di vetro rispettivamente sia al bitume che agli aggregati. I risultati di tale ricerca hanno dimostrato che la fibra di vetro ha un effetto significativo sulla resistenza Marshall, in particolare, utilizzando la fibra con lunghezza pari a 6 mm vi è una diminuzione di tale resistenza mentre adoperando la fibra di lunghezza

pari a 12 mm vi è un aumento della resistenza Marshall. Inoltre, lo studio ha dimostrato che la lunghezza della fibra gioca un ruolo importante sul modulo resiliente. [2]

In letteratura sono stati condotti diversi studi riguardanti le prestazioni reologiche dei leganti bituminosi contenenti lignina. Ad esempio, Gao et al. [10] hanno studiato l'impiego della lignina in polvere (proveniente da trucioli di legno) come bio-additivo per modificare il bitume vergine di riferimento (PG58-28) aggiungendo diverse quantità di lignina pari al 2, 4, 6 e 8% al fine di studiare le prestazioni reologiche ad alte temperature e le prestazioni a fatica del bitume modificato con lignina e quello di riferimento. I risultati hanno dimostrato che l'aggiunta del biopolimero aumenta la viscosità del bio-legante rispetto al bitume vergine di riferimento con un conseguente miglioramento delle deformazioni permanenti alle alte temperature (resistenza all'ormaiamento) dovuto all'incremento dei componenti elastici. Inoltre, la reazione di ossidazione del bio-legante, ottenuta dalla prova RTFOT, risulta ritardata rispetto alla risposta restituita dal bitume di riferimento.

Arafat et al. [11] hanno studiato gli effetti dei bio-leganti, in condizioni invecchiate e non invecchiate, impiegando tre diversi tipi di lignina in polvere in ottica della sostenibilità ambientale. Le lignine impiegate sono: la lignina Kraft, la lignina derivata dalla lavorazione del legno tenero (*black liquor*) e la lignina prodotta da bucce di riso in laboratorio. Lo studio, inoltre, si è concentrato sulla sostituzione di una piccola porzione (massimo dosaggio pari al 6%) di lignina sul bitume. I risultati ottenuti hanno dimostrato che tutti i leganti modificati presentano una maggiore tolleranza alla deformazione rispetto ai leganti non modificati, nel particolare la lignina proveniente dal *black liquor* è meno soggetta all'invecchiamento a breve termine rispetto alle altre e rispetto al bitume di riferimento mentre la lignina prodotta dalla lavorazione delle bucce di riso ha restituito un valore dell'indice di invecchiamento simile al bitume di riferimento sinonimo di prestazioni di invecchiamento soddisfacenti.

Altri studi hanno dimostrato che la lignina può essere impiegata anche in forma liquida, prodotta per esempio da rifiuti di scarto di pannelli di legno o da rifiuti industriali, per la produzione di bio-leganti. Perez et al. [12] hanno condotto una ricerca in cui è stato possibile impiegare rifiuti dall'industria di pannelli di faesite, ricco di fibre lignocellulose e altri materiali organici, per il ricavo del biopolimero lignina. Tali rifiuti industriali non sono stati sottoposti a dei pretrattamenti ovvero sono stati miscelati direttamente al bitume convenzionale, mediante un miscelatore a taglio a velocità e temperatura controllata, in percentuali pari a 5, 10, 20 e 40% in peso del bitume. Lo studio è stato effettuato in termini di grado di penetrazione, punto di rammollimento, viscosità dinamica, modulo complesso e angolo di fase. I risultati hanno dimostrato che i valori di penetrazione tendono a diminuire all'aumentare del contenuto dei rifiuti, il punto di rammollimento aumenta all'aumentare del

contenuto di lignina e la viscosità dinamica tende a diminuire all'aumentare della temperatura ma soprattutto all'aumentare del quantitativo di lignina. Inoltre, per un contenuto di lignina pari al 20%, alle alte temperature aumenta il modulo complesso (diminuisce l'angolo di fase) aumentando la resistenza all'ormaiamento mentre alle temperature intermedie si produce una migliore resistenza a fatica.

Gli stessi ricercatori hanno condotto un altro studio sulla possibilità di utilizzare la lignina, ottenuta sempre come scarto industriale dalla produzione di pannelli di legno, per il miglioramento e per la produzione di miscele in conglomerato bituminoso. La sostituzione è avvenuta nelle stesse percentuali della precedente ricerca (5, 10, 20 e 40%) in peso del bitume di riferimento indagando sulla resistenza alla suscettibilità termica, umidità e alle deformazioni permanenti. Gli operatori hanno evidenziato che a percentuali elevate di lignina (40%) la miscelazione con il bitume ha prodotto una quantità di schiuma tale da non poter portare a termine l'operazione; inoltre, per valori compresi tra 40-60% si è potuto osservare ad occhio nudo la cristallizzazione di particelle di lignina. Nel complesso, le miscele contenenti lignina hanno dimostrato una migliore resistenza ai danni causati dall'umidità e dalle deformazioni permanenti rispetto alla miscela di riferimento. Dunque, i risultati dichiarano che la sostituzione ottimale del bitume con il rifiuto liquido è pari al 20% migliorando così le prestazioni delle miscele in conglomerato bituminoso e contribuendo alla sostenibilità ambientale ed economica. [13]

In letteratura si possono trovare altre ricerche che hanno come oggetto di studio le proprietà e le caratteristiche che la lignina offre all'interno delle miscele in conglomerato bituminoso al fine di utilizzarla come sostitutivo rinnovabile del bitume. Da quelle sopra descritte si può da subito affermare che la maggior parte dei risultati e delle prestazioni sono almeno comparabili rispetto alle miscele di riferimento, il che fa sperare in un futuro in cui sia possibile la diminuzione dell'impiego del legante fossile per la costruzione di pavimentazioni flessibili comportando numerosi vantaggi economici e ambientali.

Nel presente lavoro di Tesi è stata analizzata la caratterizzazione meccanica di miscele in conglomerato bituminoso prodotte con bio-leganti contenenti lignina al fine di valutare l'utilizzo di tale bio-materiale come sostitutivo parziale al bitume con ottica alla salvaguardia e alla sostenibilità del medio ambiente. Nello specifico, è stata impiegata della lignina in polvere derivante dagli scarti dell'industria del legno, al fine di sostituire parzialmente l'impiego di bitume e realizzare conglomerati bituminosi. Tale studio risulta innovativo rispetto a quanto è possibile consultare in letteratura poiché la lignina viene dosata in un quantitativo pari al 30% in peso di bitume, di gran lunga superiore rispetto ai risultati disponibili attualmente.

## Capitolo 3

# Indagine sperimentale

### 3.1 Inquadramento del progetto

Il presente lavoro di Tesi si focalizza sullo studio di diversi tipi di lignina impiegati nella sostituzione parziale del legante bituminoso in modo da ottenere i bio-leganti (o bio-binders). Nel settore delle strutture di trasporto la necessità di impiegare bio-leganti, per le realizzazioni di pavimentazioni stradali, nasce dal fatto che il legante bituminoso (o bitume) deriva da una risorsa non rinnovabile in via di esaurimento. Inoltre, l'impiego di questi bio-materiali, oltre a garantire la salvaguardia del bitume, garantisce una riduzione notevole dell'impatto ambientale contribuendo all'economia circolare mondiale.

Nell'indagine sono state utilizzate diverse classi di bitume, le quali differiscono tra di loro per la consistenza, e diverse tipologie di biopolimero lignina per la realizzazione dei bio-binder. I bio-leganti sono stati prodotti grazie alla sostituzione (o “replacement” in inglese) della lignina sul bitume con un dosaggio pari al 30% del legante, ottimizzato in una precedente fase sperimentale. In tale fase sono state studiate anche le rispettive temperature di miscelazione e compattazione, dei diversi bitumi utilizzati, applicando il concetto di “equiviscosità”, introdotto dal programma *SHRP – Superpave*, il quale si basa sulle proprietà reologiche del materiale come la viscosità dinamica.

Ai fini di questa indagine sperimentale, per la realizzazione di miscele in conglomerato bituminoso mediante bio-leganti contenenti lignina, sono stati studiati il mix design mediante l'ottimizzazione della curva granulometrica di progetto, il contenuto di legante per ogni miscela in modo da garantire una buona lavorabilità (valutata attraverso lo studio del parametro CEI “*Compaction Energy Index*”), la caratterizzazione volumetrica e lo studio meccanico in termini di resistenza a trazione indiretta (ITS “*Indirect Tensile Strength*”).

Tali miscele prodotte con bio-leganti sono state confrontate, attraverso i termini sopra elencati, con la miscela di riferimento prodotta soltanto con bitume tradizionale (legante comunemente adoperato per la realizzazione delle pavimentazioni stradali alle nostre latitudini) al fine di valutare una possibile applicazione del biopolimero lignina come sostitutivo parziale del legante bituminoso in modo da massimizzare il suo impiego ed ottenere prestazioni confrontabili al bitume di riferimento.

Di seguito verranno descritti i materiali utilizzati nella sperimentazione, le apparecchiature e i metodi utilizzati ed infine verrà descritto nel dettaglio il programma sperimentale.

## **3.2 Materiali**

Per ottenere il conglomerato bituminoso ovvero una miscela di inerti (aggregati lapidei, filler, materiali provenienti da fresato ed eventuali additivi) impastati con un legante bituminoso, si richiede uno speciale studio di ogni elemento componente, con riferimento allo strato d'interesse (binder), come suggerito dal Capitolato speciale d'appalto scelto come riferimento.

### **3.2.1 Aggregati**

Per quanto riguarda gli aggregati naturali il Capitolato Speciale d'Appalto ANAS, punto di riferimento in questa sperimentazione, afferma che essi devono essere *“costituiti da elementi sani, duri, di forma poliedrica, puliti esenti da polvere e materiali estranei secondo le norma UNI EN 13043. 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) secondo la definizione delle norme UNI EN 13108-1”*. [14]

Per quanto concerne gli aggregati grossi (pezzature da 4 a 31,5 mm), il Capitolato al sottoparagrafo 7.1.4. continua *“l'aggregato grosso sarà costituito da frantumati, ghiaie, ghiaie frantumate, pietrischetti e graniglia che potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa”*. [14]

Mentre per gli aggregati fini (pezzature inferiori a 4 mm) il Capitolato continua affermando che: *“l'aggregato fino di tutte le miscele sarà costituito da elementi esclusivamente da sabbie di frantumazione”*.

Inoltre, devono presentare una *“composizione granulometrica determinata in conformità con la UNI EN 13108-1 e UNI EN 12697-2”* [14] utilizzando degli opportuni setacci indicati e una percentuale di bitume riferita al peso della miscela, compresa tra due valori limite.

Nella presente indagine sperimentale, al fine di ottenere la curva granulometrica di progetto nonché le miscele in conglomerato bituminoso, oltre che al fresato o RAP di cui si tratterà in seguito, sono stati utilizzati determinati aggregati naturali appartenenti alle seguenti classi granulometriche (Figura 3.1.a, b, c e d):

- Aggregato grosso (frazione 10/16);
- Pietrisco (frazione 6/12);
- Sabbia (frazione 0/4);
- Filler;



*Figura 3.1.a, b, c, d. Aggregati naturali impiegati*

Un'osservazione molto importante da fare è che nello studio del mix design sono stati utilizzati aggregati di origine calcarico piuttosto che basaltico, quest'ultimo più oneroso ma con caratteristiche fisico-meccaniche molto importanti in ambito stradale, il quale trova forte utilizzo negli strati superficiali. Gli aggregati basaltici presentano una tessitura molto spigolosa e sono soggetti all'effetto della levigatura, prodotta dal traffico veicolare, in minor entità. La scelta, dunque, del materiale calcarico è giustificato dal fatto che lo strato di binder non è uno strato superficiale bensì uno strato di collegamento del corpo stradale, dunque, non si andranno a sfruttare a pieno tutte le proprietà fisico-meccaniche sopraenunciate tipiche del materiale basaltico

### ***Conglomerato bituminoso da recupero (RAP "Reclaimed Asphalt Pavement")***

Il conglomerato bituminoso da recupero (detto anche Fresato o RAP) è il materiale proveniente dalla fresatura o dalla demolizione di pavimentazioni in conglomerato bituminoso pre-esistenti a fine vita utile oppure dallo scarto di produzione in impianto.

Nella presente ricerca il Fresato utilizzato proviene da pavimentazioni in conglomerato bituminoso non modificato (Figura 3.2) il quale è stato sottoposto sia allo studio della distribuzione granulometrica sia allo studio del contenuto di bitume per via di estrattori. La quantità di materiale utilizzato per le suddette prove è stato di 1200 g circa.



Figura 3.2. Fresato impiegato

Lo studio della distribuzione granulometrica del Fresato, mediante vagliatura meccanica per risalire alla curva granulometrica originaria, è stato eseguito in due condizioni diverse:

- 1) Pre-estrazione;
- 2) Post-estrazione.

La prima è stata eseguita prima dell'operazione di estrazione al fine di ottenere la cosiddetta "black curve" ovvero la curva granulometrica del conglomerato bituminoso di recupero tal quale mentre la seconda, avvenuta dopo l'operazione di estrazione, è stata eseguita per ottenere la "white curve" cioè la curva granulometrica originaria costituita dagli aggregati originali non ricoperti di bitume.

In Figura 3.3 sono rappresentate le curve, precedentemente descritte, a confronto.

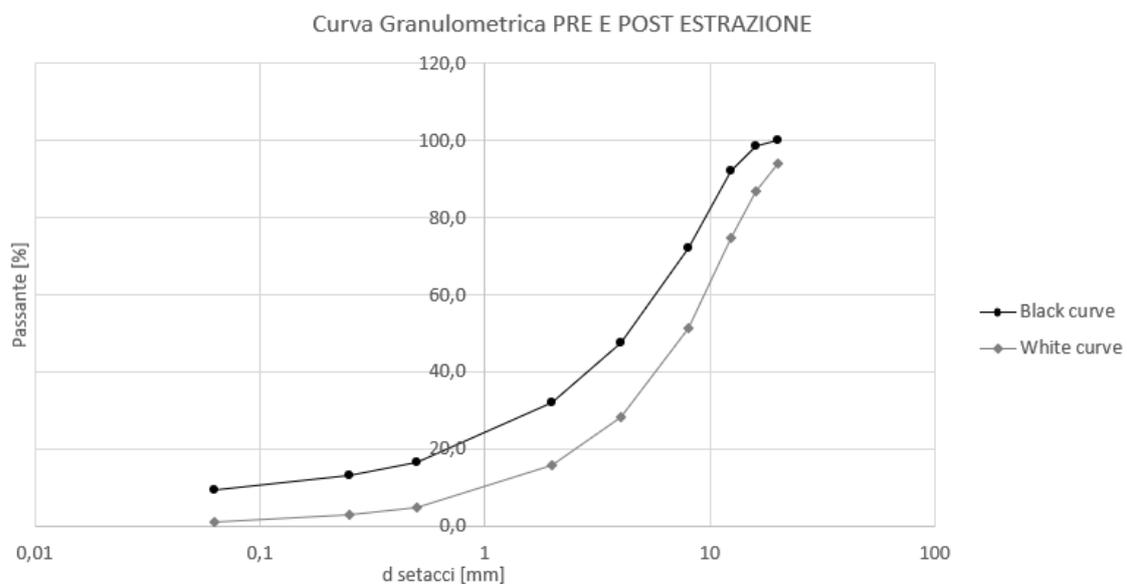


Figura 3.3. "Black curve" (sopra) e "white curve" (sotto) a confronto

Ipotizzando una totale riattivazione del bitume, al fine di ottenere la curva granulometrica di progetto per il confezionamento delle miscele in conglomerato bituminoso, è stata considerata la curva “white curve” del Fresato durante l’indagine sperimentale. Inoltre, lo studio del contenuto di bitume in peso del RAP, attraverso estrattore, ha restituito un valore pari al 4,2% rispetto alla miscela (4,4% rispetto agli aggregati).

Per uno strato di collegamento (o binder), considerato in questa sperimentazione, il Capitolato ANAS al sottoparagrafo 7.1.7.3. fornisce le aperture dei setacci UNI, il quantitativo di passante totale in peso (%) e la percentuale di bitume (Figura 3.4).

**7.1.7.3. - Binder**

Apertura setacci UNI	passante totale in peso %
setaccio 20	100
setaccio 16	90-100
setaccio 12,5	66-86
setaccio 8	52-72
setaccio 4	34-54
setaccio 2	25-40
setaccio 0,5	10-22
setaccio 0,25	6-16
setaccio 0,063	4-8

Bitume, riferito alla miscela, 4,1%-5,5% (UNI EN 12697-1 e 39) e spessori compresi tra 4 e 8 cm.

*Figura 3.4. Apertura dei setacci, quantitativo totale di passante in peso (%) e percentuale di bitume per uno strato di binder*

Grazie ai valori dei passanti è stato possibile determinare il limite superiore e inferiore del fuso di riferimento (Figura 3.5) per la costruzione della curva granulometrica di progetto. Ai fini del mix design, l’obiettivo è stato quello di ottenere una curva molto prossima a quella di centro fuso (calcolata come media aritmetica tra il limite superiore e inferiore).

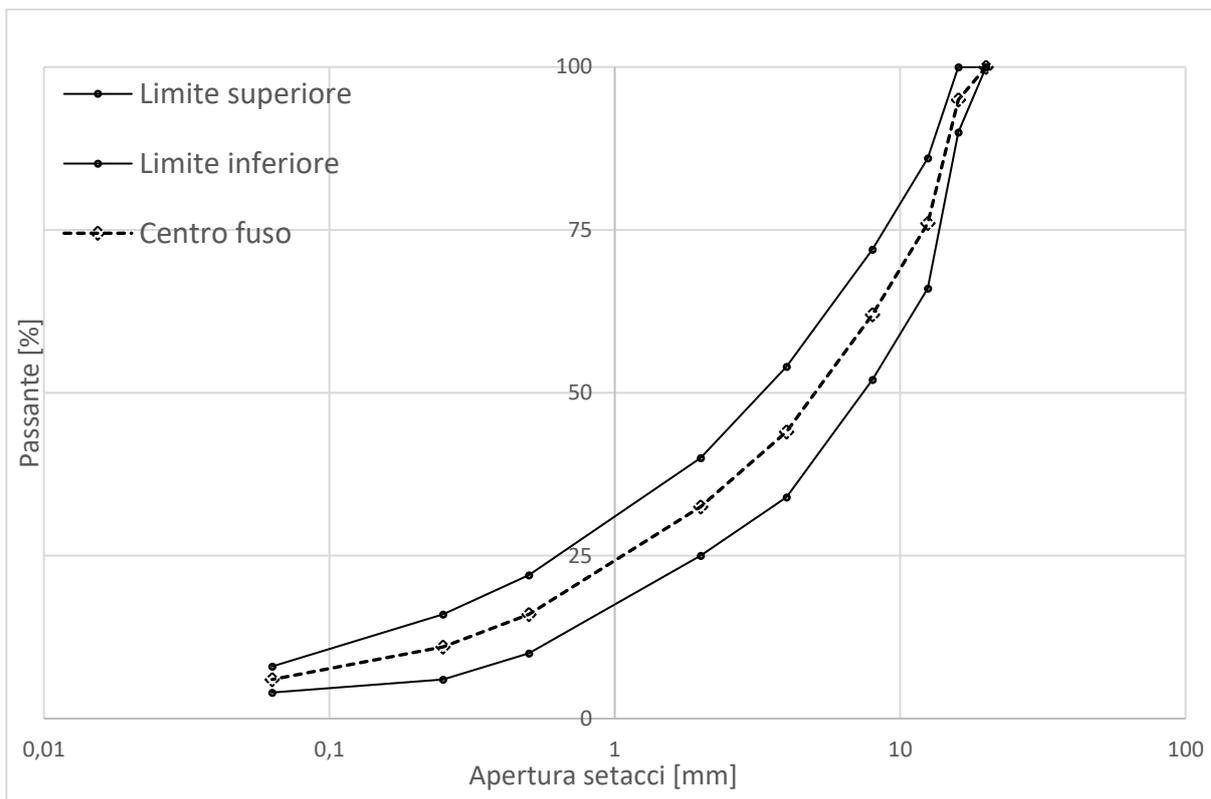


Figura 3.5. Fuso granulometrico di riferimento ANAS per uno strato di binder

Dunque, per ottenere una curva granulometrica che meglio approssima la curva di centro fuso sono state utilizzate varie pezzature diverse suddivise in quattro classi, come precedentemente descritto, le quali sono state combinate e miscelate, in percentuali diverse, per ottenere la curva desiderata all'interno del fuso di riferimento. Inoltre, il quantitativo massimo di materiale derivante da Fresato (o RAP), all'interno di questo strato di binder con bitume non modificato da polimeri, è stato assunto costante pari al 15% come viene indicato dal Capitolato (Tabella 3.1).

	% di impiego di fresato														
	Usura a			Usura b			Binder			Basebinder			Base		
Tipologia bitume	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD
% di fresato	≤10	≤15	≤15	≤10	≤15	≤15	≤15	≤25	≤20	≤15	≤25	≤20	≤15	≤30	≤25
% di ACF sul bitume	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	3-5	3-5	3-5	3-5	3-5	3-5

Tabella 3.1. Quantitativo massimo di Fresato, secondo Capitolato ANAS, per uno strato di binder

### 3.2.2 Bitumi

La produzione delle miscele in conglomerato bituminoso a caldo, nella presente indagine, è stata resa possibile mediante l'utilizzo di diversi leganti bituminosi tradizionali forniti da distributori diversi.

In particolar modo, il bitume di riferimento utilizzato è di origine italiana mentre gli altri sono di origine svedese.

I leganti bituminosi possono essere classificati in diverse classi (UNI EN 12591 – 2009) in funzione del grado di penetrazione distinguendo quelli più duri (o “*hard*” in inglese), adoperati in ambienti di esercizio più caldi, da quelli più morbidi (o “*soft*”) adoperati invece in climi più freddi. Tale distinzione si deve alla termo-dipendenza del legante alle diverse temperature di esercizio come precedentemente trattato nel Capitolo 1 al paragrafo “*Legante bituminoso*”.

In particolare, in questa indagine sperimentale per la produzione della miscela in conglomerato bituminoso di riferimento è stato utilizzato un bitume tradizionale mentre per la produzione delle altre due miscele sono stati impiegati dei bitumi più morbidi ai quali è stata rimpiazzata una parte con un quantitativo ottimale di lignina ottenendo, così, due bio-leganti.

I tre bitumi di riferimento (Figura 3.6) verranno designati come:

- B.50/70 (bitume tradizionale di riferimento);
  - B.70/100
  - B.100/150
- } (bitumi più morbidi).



Figura 3.6. Bitumi di riferimento (50/70, 70/100, 100/150)

La Tabella 3.2, derivante dalle schede tecniche, mostra le principali caratteristiche dei bitumi tradizionali (quali penetrazione, punto di rammollimento e viscosità) ricavate attraverso prove di laboratorio.

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

*Tabella 3.2. Caratteristiche dei bitumi tradizionali*

### 3.2.3 Lignina

Nel presente lavoro di Tesi la protagonista principale è stata la lignina. Tale biopolimero è stato introdotto all'interno dei leganti bituminosi più morbidi come sostituto parziale, attraverso miscelazione, con l'obiettivo di ridurre il contenuto di bitume in uno strato di binder, generando bio-leganti aventi la medesima classe di consistenza del bitume di riferimento (50/70).

Ne sono state utilizzate due tipologie diverse (Figura 3.7):

- Lignina "S" (origine Svezia);
- Lignina "B" (origine Bielorussia).



Figura 3.7. Lignina "B" e lignina "S"

Il dosaggio di lignina nei leganti bituminosi è stato assunto pari al 30%, ottimizzato in una fase precedente a questa indagine sperimentale in cui si sono voluti realizzare due bio-leganti (contenenti lignina) simili in termini di consistenza al bitume di riferimento. Nel particolare, la lignina “S” è stata utilizzata per il bitume 70/100 mentre la lignina “B” è stata utilizzata per il bitume 100/150.

Le due lignine utilizzate per questa ricerca differiscono per diverse proprietà chimico-fisiche oltre che per l’odore e il colore; di seguito verrà mostrata la sintesi delle schede tecniche dei suddetti biopolimeri.

- Lignina “S”: lignina proveniente dalla Svezia, ha origine come sottoprodotto del trattamento termochimico ed enzimatico del legno, colore marrone scuro, punto di congelamento da -5°C a 0°C, contenuto di umidità tra 50-60%, pH tra 4 e 6;
- Lignina “B”: lignina proveniente dalla Bielorussia, definita come sostanza amorfa di diverso colore che varia dal crema chiaro al marrone scuro, le dimensioni delle particelle variano da pochi micron a un centimetro, presenta un forte odore alla soglia olfattiva, temperatura di infiammabilità pari a 195°C, temperatura di combustione senza fiamma pari a 185°C, densità pari a 1,25-1,45 g/cm<sup>3</sup>.

In fase operativa, a monte della miscelazione con il legante bituminoso, le lignine sono state sottoposte per diverse ore alla temperatura di 105°C in forno per favorire l’evaporazione di acqua in eccesso. In questa fase il colore delle lignine è passato da un marrone scuro ad una gradazione più chiara, sinonimo dell’evaporazione del contenuto di umidità. Inoltre, nella fase di pre-essiccazione, qualora i granuli di lignina fossero di dimensioni notevoli tali da provocare rigonfiamenti in sede di miscelazione, è stata necessaria la frantumazione per via manuale che oltre a diminuire le dimensioni ha permesso anche una maggiore evaporizzazione del contenuto di umidità all’interno.

### 3.3 Apparecchiature e metodi

Per la realizzazione dei bio-leganti, delle miscele in conglomerato bituminoso e dei provini confezionati nonché delle prove effettuate su di essi, sono state utilizzate diverse apparecchiature di laboratorio. La presente trattazione andrà a descrivere, in ordine cronologico, la procedura e le componenti che ognuna di esse presenta.

#### 3.3.1 Vagliatura meccanica

L'analisi granulometrica del fresato è stata realizzata mediante vagliatura meccanica (Figura 3.8).

Sono stati utilizzati i setacci (caratterizzati da una apertura in mm pari a 20; 16; 12,5; 8; 4; 2; 0,5; 0,25; 0,063; <0,063 o fondello) come viene richiesto dal Capitolato per uno strato di binder.

Questi sono stati impilati con dimensioni decrescenti delle aperture dall'alto verso il basso dove l'ultimo vaglio, chiamato anche fondello (F), raccoglie il materiale passante al setaccio di apertura 0,063 mm. Per evitare la perdita di materiale, durante l'operazione di vagliatura, la pila di vagli viene chiusa all'estremità superiore con un coperchio (D). La sistemazione viene alloggiata, e bloccata mediante un'asta trasversale, alla testa di un motore vibrante, il quale realizza la vagliatura automatica.

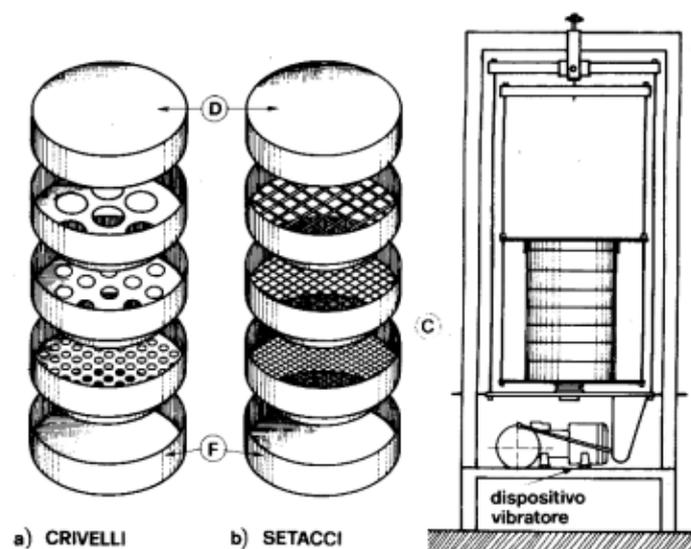


Figura 3.8. Sistemazione dei crivelli o dei setacci a sinistra e dispositivo per la setacciatura automatica a destra

Prima della setacciatura, sono state compiute alcune fasi preliminari:

1. Quartatura del RAP (Figura 3.9);



*Figura 3.9. Quartatura del RAP*

2. Sono stati lasciati asciugare all'aria aperta, in particolar modo gli aggregati calcari, per eliminare la presenza di umidità al loro interno (Figura 3.10);



*Figura 3.10. Esiccazione*

3. Gli aggregati vengono immessi, in quantitativi noti, all'interno del setaccio posto in sommità, viene inserito il coperchio e azionato il dispositivo vibratore per la setacciatura automatica (Figura 3.11);



*Figura 3.11. Vagliatura attraverso dispositivo vibratore*

4. Si annota la massa trattenuta (in grammi) in ogni setaccio grazie all'utilizzo di una bilancia di precisione (Figura 3.12) e successivamente si calcolano il trattenuto parziale (%), il trattenuto cumulativo (%) e il passante cumulativo (%);



*Figura 3.12. Bilancia di precisione*

5. I dati, infine, vengono plottati in modo da restituire la curva granulometrica.

### **3.3.2 Estrattore**

L'estrattore è un'apparecchiatura di laboratorio, utilizzata per separare aggregati, bitume e filler contenuti in un conglomerato bituminoso, consentendo nel caso in oggetto di risalire al contenuto di bitume all'interno del Fresato (o RAP) derivante dalla demolizione di vecchie pavimentazioni

stradali. Ricavato tale quantitativo di bitume, insieme al bitume vergine di aggiunta, è stato possibile confezionare provini in conglomerato bituminoso tramite tecnica di riciclaggio a caldo. Allo stesso tempo, è anche possibile eseguire un'analisi granulometrica post-estrazione mediante setacciatura meccanica.

L'utilizzo di tale apparecchiatura prevede l'utilizzo di:

- Una bilancia di precisione per determinare il peso del campione di RAP e degli elementi di prova;
- Un cestello in acciaio con coperchio dove viene inserito all'interno il materiale fresato;
- Una capsula in acciaio per raccogliere il filler di estrazione;
- Motore di raffreddamento;
- Solvente o liquido di "lavaggio";
- Un paio di guanti termoresistenti per il maneggio dei vari elementi nella fase di post-estrazione;
- Una pistola ad aria compressa per la pulizia interna del cestello.

Di seguito viene descritta la procedura di estrazione accompagnata da immagini per una facile comprensione di tale apparecchiatura.

1. Il fresato viene rimescolato mediante una paletta in acciaio (per garantire una miscela il più possibile eterogenea) e viene raccolto una porzione di 1200 g circa;
2. Il materiale raccolto viene setacciato (setacciatura di pre-estrazione) e vengono annotati il contenuto di massa trattenuta in grammi ad ogni setaccio, inclusa la massa del filler passante al setaccio 0,063 mm;
3. La capsula vuota viene pesata ("*Tara capsula*") e all'interno viene inserito un foglio sottile di carta per impedire il danneggiamento del materiale (Figura 3.13);



Figura 3.13. Capsula

4. La capsula viene inserita in modo verticale nel secondo blocco dell'estrattore, analogamente il cestello in acciaio accompagnato dal coperchio vengono pesati ("*Tara cestello*", Figura 3.14). I valori delle tare vengono annotati in una tabella riassuntiva;



*Figura 3.14. Cestello*

5. Il fresato di pre-estrazione setacciato viene inserito all'interno del cestello e viene pesato ("*lordo cestello prima*");
6. Si controllano che il sistema di raffreddamento sia minore ai 15°C e che il liquido di lavaggio sia compreso tra i valori minimo e massimo. Il cestello viene alloggiato orizzontalmente e chiuso nel primo blocco dell'estrattore (Figura 3.15.a e b);



*Figura 3.15.a e b. A sinistra l'estrattore e a destra il motore di raffreddamento*

7. L'apparecchiatura viene avviata, l'operazione di estrazione consta di sei cicli di lavaggio a circuito chiuso, ed ha una durata di circa un'ora. Al termine, con l'aiuto di guanti termoresistenti, il cestello viene estratto e pesato ("*lordo cestello dopo*");

8. Mediante una serie di semplici calcoli viene determinato il contenuto di bitume di all'interno del Fresato;
9. Il procedimento si ripete per successive estrazioni al fine di ottenere una media dei risultati.

### 3.3.3 Miscelatore Ross

Il miscelatore Ross è un'apparecchiatura di laboratorio, il quale consente la miscelazione del bitume con altri materiali. In particolar modo, ai fini di questa ricerca sperimentale, è stato utilizzato per la miscelazione del bitume con la lignina per la produzione dei bio-leganti.

Tale apparecchiatura è composta da un supporto mobile per la testa rotante in acciaio e un fornello riscaldato attraverso un termostato dove viene alloggiato il contenitore di bitume (Figura 3.16).



*Figura 3.16. Miscelatore Ross*

Per ottenere una corretta miscelazione del legante bituminoso, quest'ultimo deve presentare una consistenza fluida ovvero deve essere continuamente riscaldato con un continuo monitoraggio della temperatura mediante una sonda termometrica posizionata ad una certa altezza grazie ad un supporto metallico fisso come si osserva dalla Figura 3.16. La temperatura di miscelazione deve rimanere costante, ed è stata selezionata in modo tale da garantire il principio di equi-viscosità per tutti i bitumi di interesse.

La testa rotante, utile per la frantumazione delle particelle più grossolane e dure della lignina nonché per la miscelazione del bitume con quest'ultima, è costituita da un'elica interna e una corona forata a intervalli (Figura 3.17).



*Figura 3.17. Testa rotante utilizzata*

Le operazioni a monte della miscelazione consistono nel determinare il quantitativo di lignina da mescolare con il legante bituminoso e nel preriscaldare il forno fino a raggiungere la temperatura di miscelazione.

Di seguito viene spiegata la procedura di miscelazione mediante miscelatore Ross:

1. Il contenitore di bitume in esame viene messo a riscaldare in forno alla temperatura di miscelazione per circa un'ora;
2. Successivamente, viene inserito all'interno del fornello, preriscaldato alla temperatura di miscelazione;
3. La testa rotante viene abbassata e immersa all'interno del legante bituminoso;
4. Viene imposta e fissata la velocità di miscelazione, 5000rpm, quindi, viene azionato il miscelatore;
5. La lignina viene aggiunta in piccole quantità alla volta per garantire una corretta miscelazione senza creare rigonfiamenti nel bitume e per permettere la disgregazione dei granuli (Figura 3.18);
6. La sonda termometrica viene posizionata all'interno del bitume in modo da controllare la temperatura di miscelazione, la quale deve rimanere pressoché costante;

7. Inserita tutta la lignina si lascia ulteriormente miscelare per altri 30 minuti.



*Figura 3.18. Miscelazione lignina e bitume mediante miscelatore Ross*

### 3.3.4 Miscelatore Infratest

Il miscelatore Infratest (Figura 3.19) è un macchinario da laboratorio utilizzato per la miscelazione degli aggregati con il legante bituminoso, ed eventuali additivi, a una temperatura di miscelazione preimpostata.



*Figura 3.19. Miscelatore Infratest*

Il miscelatore permette la realizzazione del conglomerato bituminoso a caldo utilizzando temperature elevate le quali sono state studiate, nella fase iniziale della sperimentazione, per i diversi tipi di legante. Questa apparecchiatura è costituita da un contenitore cilindrico cavo in acciaio sul quale vengono introdotti i diversi materiali, la parte superiore presenta un supporto dotato di pale rotanti in acciaio, all'interno è presente una sonda che permette il monitoraggio continuo della temperatura attraverso il display posizionato esternamente.

La procedura per la realizzazione delle miscele in conglomerato bituminoso viene descritta dettagliatamente nel seguito:

1. Gli aggregati (aggregato grosso, pietrisco, sabbia e filler) vengono scaldati per tre ore in forno, il bitume viene scaldato per un'ora mentre il Fresato viene scaldato per dieci minuti. Il tutto a una temperatura pari a quella di miscelazione;
2. Vengono inseriti rispettivamente gli aggregati grossi, il pietrisco e la sabbia all'interno del contenitore per 30 secondi ad una velocità di rotazione delle pale pari a 180rpm;
3. Viene introdotto il legante bituminoso, nella quantità ottimizzata nello studio del mix design, per 120 secondi ad una velocità di 180rpm. In questo stadio gli aggregati vengono rivestiti da un film di bitume;
4. Il filler è l'ultimo materiale ad essere inserito nella miscelazione, la velocità di rotazione rimane invariata a 180rpm per 180 secondi al fine di ottenere il conglomerato bituminoso desiderato (Figura 3.20).



*Figura 3.20.* Conglomerato bituminoso prodotto mediante miscelatore Infratest

A miscelazione conclusa il conglomerato viene travasato all'interno di una teglia di grandi dimensioni per effettuare lo "sporzionamento" ovvero la suddivisione del conglomerato, in quantità desiderate, conformi alla formazione di ciascun provino. Ogni singola teglia viene inserita in forno per quattro ore, alla temperatura di compattazione, al fine di simulare l'invecchiamento a breve termine che le miscele subiscono (nella realtà) nelle operazioni di produzione e trasporto in sito. Successivamente si procede alla compattazione attraverso l'uso della pressa giratoria.

### 3.3.5 Pressa giratoria Pine

La pressa giratoria Pine è un'apparecchiatura di laboratorio utilizzata per la compattazione delle miscele in conglomerato bituminoso al fine di confezionare provini (Figura 3.21).



Figura 3.21. Pressa giratoria Pine

Il Capitolato Speciale d'Appalto ANAS, al sottoparagrafo 7.1.8. "Requisiti di accettazione", descrive i parametri di compattazione della miscela in conglomerato bituminoso (Tabella 3.3).

Pressione verticale kPa	600 ± 3	
Angolo di rotazione	1,25 ± 0,02	
Velocità di rotazione (giri/min)	30	
Diametro provino (mm)	150	Per base e basebinder
Diametro provino (mm)	100	Per usura A ,B e Binder

Tabella 3.3. Parametri di compattazione descritti dal Capitolato ANAS

La compattazione attraverso pressa giratoria Pine, in laboratorio, simula l'azione dei rulli compattatori in sito. La Figura 3.22 mostra graficamente i parametri di compattazione e le componenti di tale apparecchiatura.

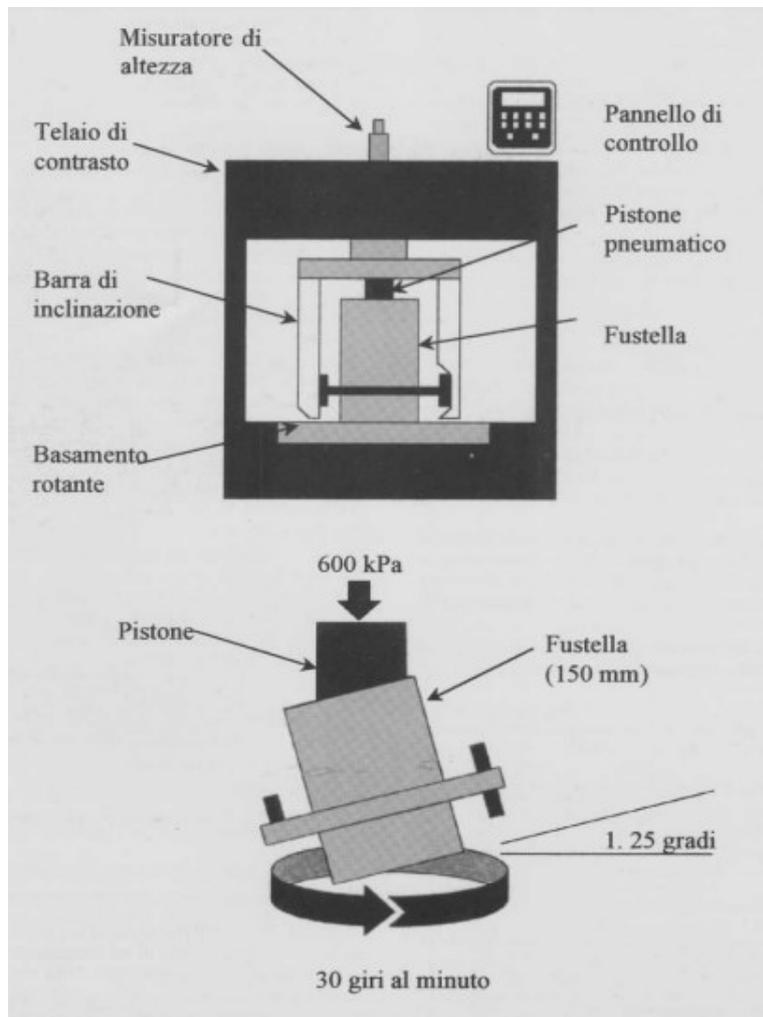


Figura 3.22. Componenti e parametri della pressa giratoria

Le modalità di compattazione possono essere di due tipologie:

- A energia imposta (fissando il numero di giri);
- Ad altezza imposta (fissando l'altezza finale di compattazione).

Nello studio del mix design, per la verifica della percentuale di vuoti, è stata utilizzata la modalità ad energia imposta fissando il numero di giri a 180 per un bitume tal quale (non modificato) come richiesto dal Capitolato nel sottoparagrafo 7.1.8.2. Mentre per le verifiche di caratterizzazione meccanica (prova a trazione indiretta ITS) è stata utilizzata la modalità ad altezza imposta pari a 60 mm utilizzando un diametro della fustella di 100 mm.

La procedura di compattazione per il confezionamento di provini in conglomerato bituminoso viene descritta dettagliatamente nel seguito:

1. La fustella, un disco in acciaio del diametro di 100 mm e la teglia contenente la miscela vengono estratte dal forno, avente la temperatura di compattazione, e vengono posizionati su un tavolo da lavoro;
2. Viene introdotto all'interno della fustella un foglio di carta circola del diametro di 100 mm, per facilitare le operazioni di estrazione; quindi, viene versata la miscela (Figura 3.23);



*Figura 3.23. Versamento della miscela all'interno della fustella*

3. Successivamente viene ricoperto con un secondo foglio di carta circolare su cui sono stati segnati precedentemente i dati identificativi del provino, ed infine viene inserito il disco di acciaio superiore; dopodiché la fustella viene introdotta all'interno dell'apparecchiatura e ruotata manualmente fino ad incastro;
4. A fine compattazione il provino viene estruso dalla fustella attraverso un sistema di pompaggio (Figura 3.24).



*Figura 3.24. Provino confezionato mediante pressa giratoria Pine*

Durante la procedura di compattazione è stato possibile determinare la curva di compattazione di ogni provino, la quale ha come ordinata il grado di addensamento (%G<sub>mm</sub>) e come ascissa il numero di giri (Figura 3.25).

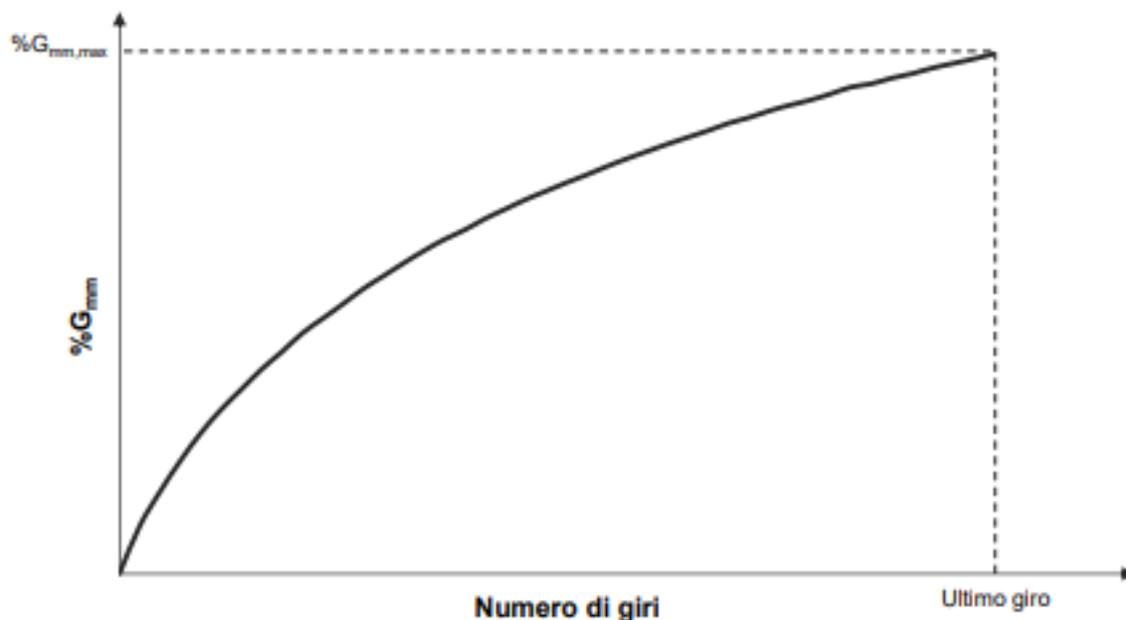


Figura 3.25. Curva di compattazione

Tale curva è stata ottenuta attraverso una serie di calcoli in cui sono stati considerati le altezze dei provini, nell'operazione di compattazione, al giro numero 5, 8, 10 e successivamente ogni cinque giri fino al giro numero 180 come precisato per uno strato di binder nel Capitolato.

Costruita la curva di compattazione per ogni provino, lo studio della compattabilità continua attraverso la determinazione dell'indice CEI (*Compaction Energy Index*), il quale rappresenta il lavoro svolto dal rullo compattatore in sito per compattare la miscela fino al raggiungimento della densità richiesta, prima dell'apertura del traffico.

L'indice CEI viene calcolato come l'area sottesa alla curva di compattazione a partire dall'ottava rotazione fino al 92% del grado di compattazione finale (Figura 3.26).

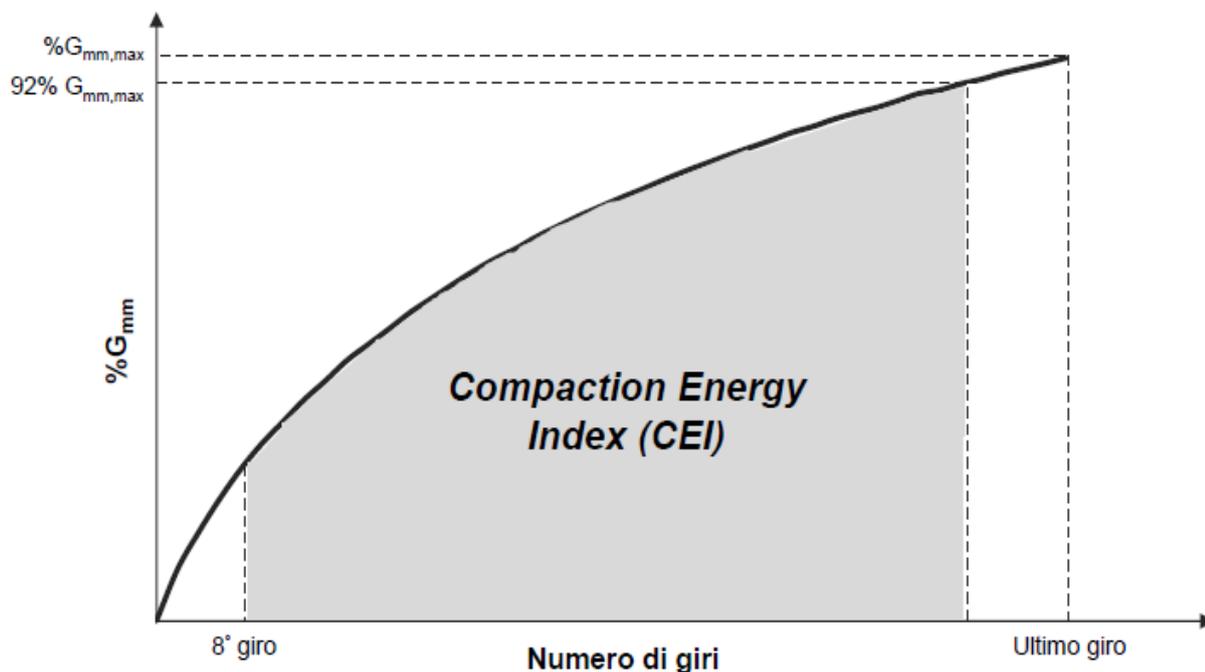


Figura 3.26. Determinazione Indice CEI

Come limite inferiore è stato preso l'ottavo giro per simulare lo sforzo applicato da una tipica macchina vibrofinitrice durante le operazioni di stesa, mentre come limite superiore è stato considerato il grado di compattazione pari al 92%, il quale rappresenta la densità raggiunta al termine della costruzione della pavimentazione prima che essa sia aperta alla circolazione e subisca un ulteriore addensamento dovuto ai carichi veicolari.

Miscele con bassi valori di CEI sono da preferirsi, in quanto caratterizzate da una migliore compattabilità (maggiore lavorabilità). Al contempo valori troppo ridotti di tale indice sono da evitare in quanto caratterizzano miscele troppo "soffici".

### 3.3.6 Caratterizzazione volumetrica

La valutazione e la verifica delle caratteristiche volumetriche (tenore dei vuoti) dei provini confezionati attraverso pressa giratoria Pine possono avvenire, tra altri, mediante il metodo geometrico e il metodo pratico dry.

Lo studio del contenuto di vuoti all'interno dei provini, oltre che per il confronto delle miscele ai fini di questa indagine sperimentale, permette capire il comportamento della miscela in esercizio. Una miscela che presenta un basso tenore di vuoti ha un'alta resistenza meccanica in esercizio rispetto a una miscela che presenta un basso tenore di vuoti la quale, sarà più permeabile e quindi maggiormente esposta agli agenti atmosferici accelerando il processo di invecchiamento del bitume.

Per la determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini in conglomerato bituminoso la normativa da seguire è la UNI EN 12697-8.

Il calcolo della percentuale dei vuoti si esegue con la seguente formula:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m}$$

Dove:

$V_m$  = indice dei vuoti espresso in percentuale;

$\rho_m$  = massa volumica massima;

$\rho_a$  = massa volumica apparente del provino in esame.

La massa volumica massima  $\rho_m$  (UNI EN 12697 – 5) è stata determinata dalla seguente espressione:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{\%Agg}{\gamma_{agg}} + \frac{\%Bit}{\gamma_{bit}} + \frac{\%Lig}{\gamma_{lig}}}$$

Dove:

$\%Agg$  = percentuale di aggregati in peso rispetto alla miscela;

$\%Bit$  = percentuale di bitume in peso rispetto alla miscela;

$\%Lig$  = percentuale di lignina in peso rispetto alla miscela;

$\gamma_{agg}$  = massa volumica degli aggregati [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

$\gamma_{bit}$  = massa volumica del bitume [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];

$\gamma_{lig}$  = massa volumica della lignina [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

Mentre la massa volumica apparente  $\rho_a$  è stata ottenuta mediante il metodo “*dry*” e mediante il metodo “geometrico” (UNI EN 12697 - 6).

La procedura del metodo “*dry*” (procedura A, dry bulk density) è riassunta nei seguenti passaggi:

1. La massa in aria (Figura 3.27) del provino viene determinata mediante una bilancia idrostatica ( $m_1$ );



Figura 3.27. Massa in aria

2. Viene determinata la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova  $\rho_w$  misurata mediante una sonda termometrica (Figura 3.28), da correggere eventualmente del fattore K (Tabella 3.4), in base alla variazione della temperatura stessa rispetto ai 25°C;



Figura 3.28. Sonda termostatica

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tabella 3.4. Fattore di correzione K in funzione della temperatura dell'acqua

3. Viene determinata la massa del provino immerso in acqua ( $m_2$ ) mediante un cestello appeso alla bilancia idrostatica (Figura 3.29).



Figura 3.29. Massa in acqua

Dunque, la massa volumica apparente “dry” viene calcolata mediante la seguente espressione:

$$\rho_{dry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_w$$

La procedura del metodo “geometrico” (procedura D, cylindrical specimen) è riassunta nei seguenti passaggi:

1. Si misura l’altezza media del provino in esame;
2. Si misura il diametro medio del provino in esame.

La misurazione è eseguita mediante un calibro a cursore (Figura 3.30).



Figura 3.30. Misurazione mediante calibro a cursore

La massa volumica apparente geometrica ( $\rho_{geom}$ ) viene calcolata attraverso la seguente espressione:

$$\rho_{geom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^3$$

Dove:

h = altezza del provino;

d = diametro del provino.

### 3.3.7 Prova a trazione indiretta (ITS)

I provini confezionati vengono successivamente esaminati attraverso prova di resistenza a trazione indiretta ITS (*Indirect Tensile Strength*). I provini cilindrici da testare vengono portati alla temperatura di prova specifica, vengono alloggiati nella macchina per la prova di compressione fino a portarli a rottura. La rottura in questione avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson).

La resistenza a trazione indiretta, di provini cilindrici di miscele bituminose, è determinata come la massima sollecitazione di trazione calcolata dal carico di punta applicato a rottura; la norma di riferimento è la UNI EN 12697 – 23.

La strumentazione di laboratorio impiegata per la suddetta prova è la pressa meccanica Matest (Figura 3.31).



Figura 3.31. Apparecchiatura per prova a trazione indiretta Matest

Tale apparecchiatura presenta una testa di carico superiore fissa, collegato alle aste di guida della testa di prova, una testa di carico inferiore mobile fissata a una base (1) e due strisce di carico in acciaio temprato aventi la superficie concava con raggio di curvatura corrispondente al raggio nominale del provino (2). Tra le strisce di carico viene alloggiato il provino cilindrico (3) assicurandosi che le strisce vengano pulite prima dell'utilizzo (Figura 3.32).

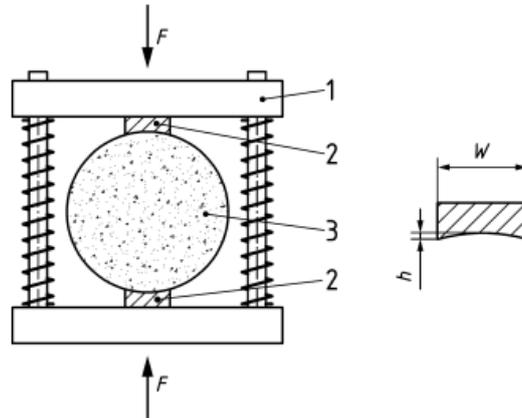


Figura 3.32. Testa di prova con gli alloggi di carico e provino

A valle dell'esecuzione della prova, i provini vengono condizionati alla temperatura di prova 25 °C per almeno 4 ore.

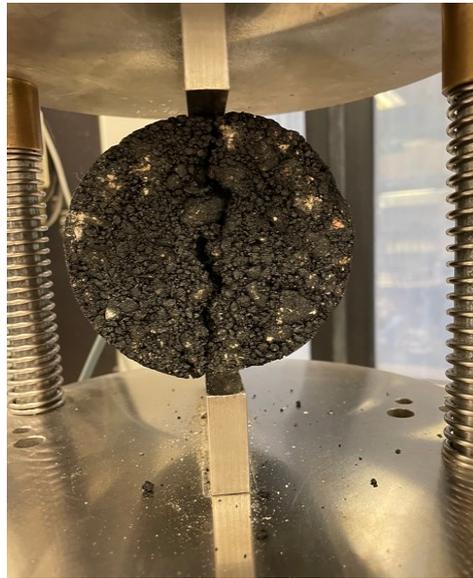
La procedura viene descritta in seguito:

1. Il provino in esame viene collocato tra i due alloggi di carico assicurandosi che sia ben centrato (Figura 3.33);



Figura 3.33. Provino in esame tra le due strisce di carico

2. I dati di riconoscimento del provino vengono inseriti manualmente all'interno di un elaboratore elettronico esterno mediante il software UTM-II;
3. L'apparecchiatura viene avviata, la traversa di carico inferiore avanza contro la testa di carico superiore ad una velocità costante pari a  $50 \pm 2$  mm/min fino al raggiungimento della rottura del provino (Figura 3.34);



*Figura 3.34. Provino dopo rottura*

4. Il valore della resistenza a trazione indiretta e il carico di punta ultimo vengono letti e annotati;
5. La procedura si ripete per ogni singolo provino.

La resistenza a trazione indiretta, dunque, consente lo studio della resistenza delle pavimentazioni permettendo di avere un'idea della trasmissione dei carichi veicolari esterni, attraverso lo strato di collegamento, agli strati più profondi i quali sono soggetti a sforzi di trazione e flessione. Tali sforzi producono una serie di microfessurazioni, che sviluppandosi agli strati più superficiali, diventano via preferenziale per l'infiltrazione delle precipitazioni atmosferiche con conseguente espansione delle fessure, in periodo invernale, dovuto alla formazione di ghiaccio.

Il valore di ITS viene calcolato attraverso la seguente espressione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t}$$

Dove:

P = massimo carico assiale di compressione;

d = diametro del provino;

t = altezza media (spessore) del provino.

### 3.4 Programma sperimentale

La ricerca sperimentale è stata condotta dagli stessi operatori 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 di questo lavoro di Tesi è stato focalizzato sulla produzione di miscele in conglomerato bituminoso (utilizzando leganti bituminosi diversi e lignina) e sullo studio delle caratteristiche meccaniche, dei suddetti conglomerati, in termini di:

- Mix design;
- Lavorabilità (Indice CEI);
- Caratterizzazione volumetrica;
- Resistenza a trazione indiretta (ITS).

Inoltre, le temperature di miscelazione e di compattazione per le miscele indagate nel rispetto del principio di equi-viscosità (introdotto nel progetto SHRP) sono riportate nella Tabella 3.5.

Legante	Tmix [°C]	Tcomp [°C]
<b>B.50/70</b>	151	138
<b>B.70/100_S_30</b>	180	167
<b>B.100/150_B_30</b>	172	160

Tabella 3.5. Temperature di miscelazione e compattazione delle miscele in conglomerato bituminoso

Si rimanda al capitolo 4 “Analisi dei risultati” per la discussione dei risultati ottenuti per ogni fase della sperimentazione.

#### 3.4.1 Caratterizzazione meccanica dei conglomerati bituminosi

##### *Mix design e lavorabilità*

Ai fini di questo lavoro di Tesi, il programma sperimentale ha avuto inizio attraverso la miscelazione e compattazione per la realizzazione di miscele in conglomerato bituminoso per uno strato di binder.

Sono stati considerati:

- 3 tipi di leganti bituminosi (50/70 di riferimento, 70/100 e 100/150);
- 2 tipi di lignina (lignina “S” e lignina “B”);
- 2 curve granulometriche di progetto (di cui la seconda è quella ottimizzata ai fini di tale studio).

Lo studio del mix design si è concentrato sull'analisi volumetrica dei provini analizzando il risultato della compattazione, i quali devono rispettare i requisiti di accettazione forniti dal Capitolato Speciale d'Appalto ANAS. Con riferimento a uno strato di binder, nei sottoparagrafi 7.1.7.3. e 7.1.8.2. il Capitolato stabilisce che:

- Il contenuto di bitume, riferito alla miscela, è compreso tra 4,1% e 5,5% (UNI EN 12697 – 1 e 39) e spessori compresi tra 4 e 8 cm;
- Percentuale di vuoti rappresentativo compreso tra il 3% e 6%, corrispondente al secondo livello di numeri di giri N2 (medio).

Il Capitolato ANAS permette la determinazione del fuso di riferimento all'interno del quale si deve trovare la curva granulometrica di progetto prossima al centro fuso (calcolato come media aritmetica tra il limite superiore e inferiore).

La prima curva granulometrica di progetto (Figura 3.35) è stata ricavata mediante la combinazione delle varie classi granulometriche a disposizione, rappresentata nella Tabella 3.6.

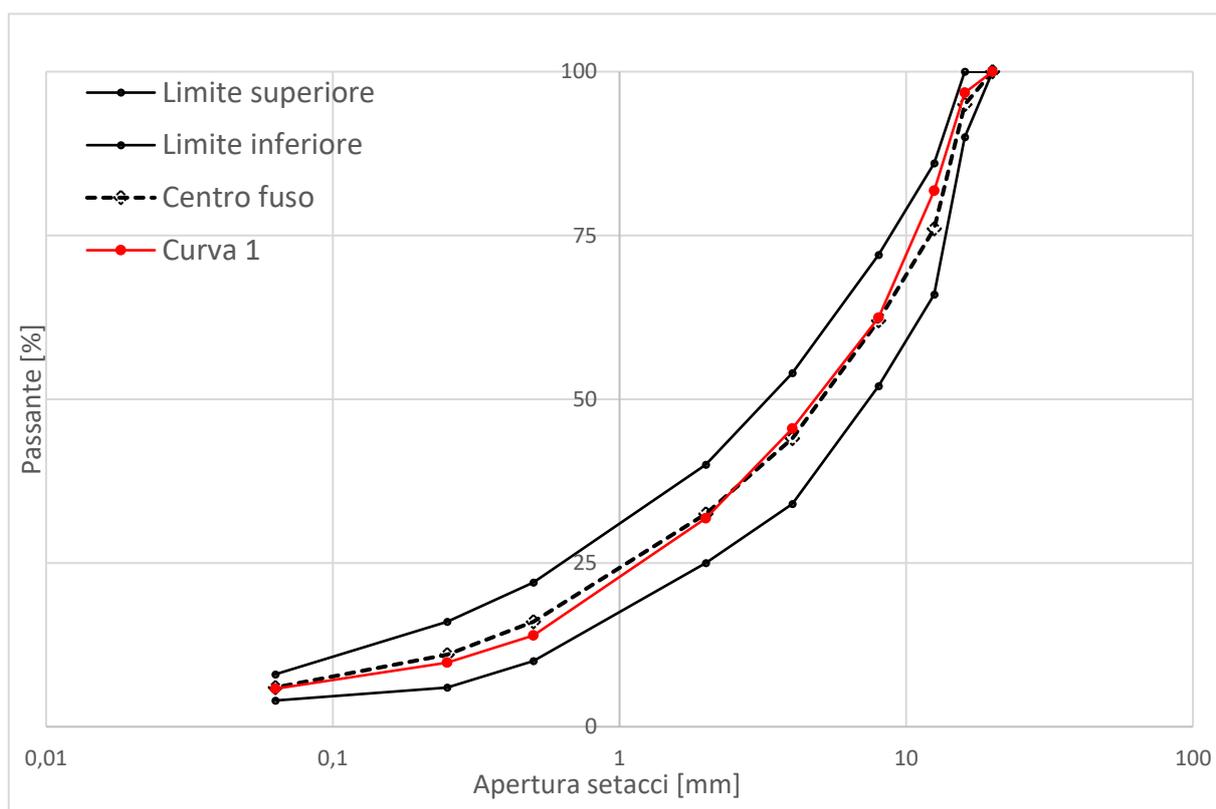


Figura 3.35. Curva granulometrica di progetto 1

Setacci	CA1 10-16	CA2 6-12	Sabbia 0-4	Filler	RAP (attuale)	Progetto
mm	<b>20,0</b>	<b>25,0</b>	<b>35,0</b>	<b>5,0</b>	<b>15,0</b>	%
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	62,4
4	0,0	1,3	94,3	100,0	47,5	45,5
2	0,0	0,9	62,1	100,0	32,3	31,8
0,5	0,0	0,6	18,2	98,4	16,6	13,9
0,25	0,0	0,5	8,4	95,0	13,5	9,8
0,063	0,0	0,2	1,2	77,3	9,5	5,8

Tabella 3.6. Combinazione classi granulometriche per curva 1

Attraverso questa prima curva di progetto sono state realizzate miscele in conglomerato bituminoso utilizzando percentuali di bitume che rientrano all'interno del range dettato dal Capitolato (tra 4,1% e 5,5%):

- Bitume di riferimento 50/70: 4,2% - 4,8% - 5,4%.
- Bio-legante 70/100 con lignina "S": 4,8% (3,5%) – 5,4% (4,0%) – 6,6% (4,8%).

I valori tra parentesi (nel bio-legante 70/100) rappresentano il contenuto di bitume effettivo mentre gli altri valori rappresentano il contenuto di bitume e lignina.

Non sono state realizzate miscele con il bio-legante 100/150 con lignina "B" poiché, come sarà spiegato nel Capitolo 4 "Analisi dei risultati", nello studio del mix design volumetrico (mediante metodo "dry") il tenore dei vuoti non rientrava nei limiti forniti dal Capitolato.

Pertanto, è stato deciso di ottimizzare ulteriormente la curva, aumentando il contenuto di fino a discapito degli aggregati grossi, ottenendo una seconda curva granulometrica di progetto (Figura 3.36).

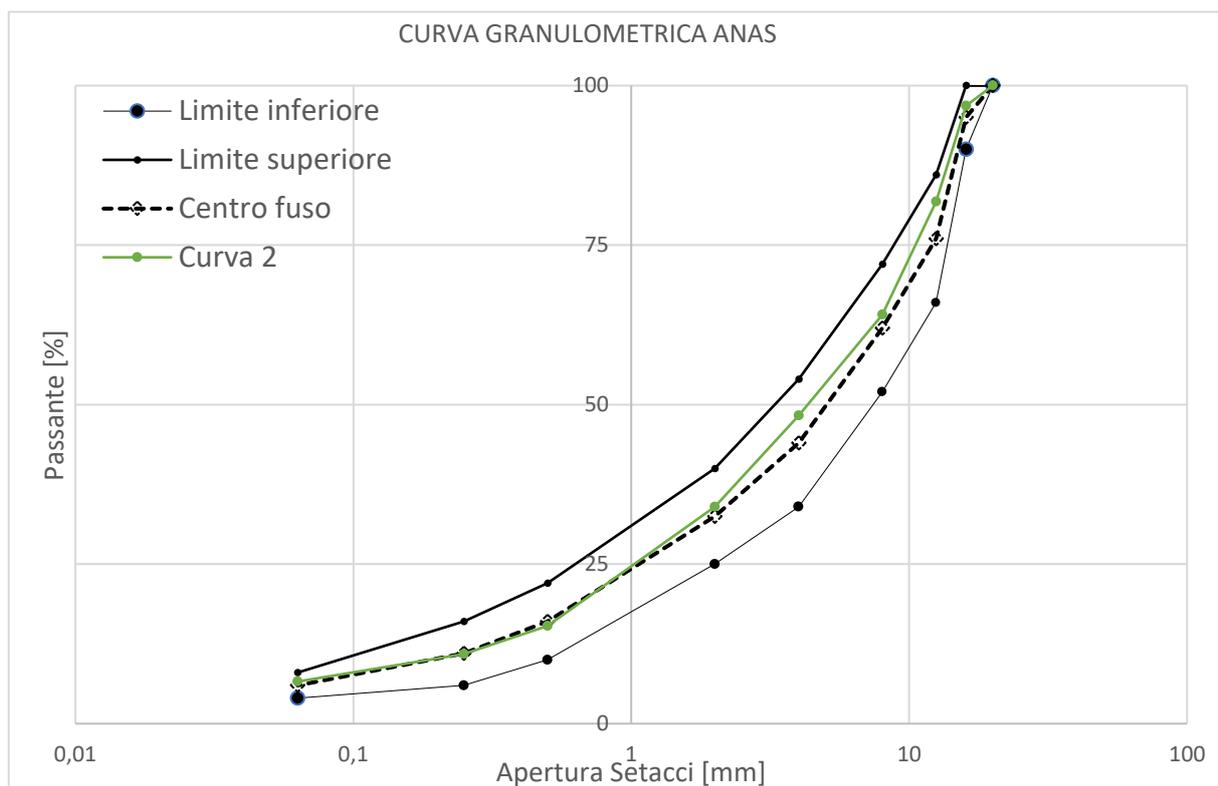


Figura 3.36. Curva granulometrica di progetto 2

La combinazione delle varie classi granulometriche per ottenere tale curva è rappresentata nella Tabella 3.7.

Setacci	CA1 10-16	CA2 6-12	Sabbia 0-4	Filler	RAP (attuale)	Progetto
mm	<b>20,0</b>	<b>22,0</b>	<b>37,0</b>	<b>6,0</b>	<b>15,0</b>	%
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

Tabella 3.7. Combinazione classi granulometriche per curva 2

Inoltre, per la realizzazione delle miscele in conglomerato bituminoso è stato impiegato un quantitativo di RAP pari al 15% della miscela (quantitativo massimo per uno strato di binder secondo normativa).

### **Caratterizzazione volumetrica**

Nella presente indagine sperimentale, ai fini della caratterizzazione meccanica dei provini in conglomerato bituminoso, si desidera avere un tenore di vuoti pari al 4,5%. Tale percentuale di vuoti, per uno strato di binder, ricade all'interno del range (3-6%) fissato dal Capitolato ANAS nel sottoparagrafo 7.1.8.2. al livello di numeri di giri N2 (medio).

La caratterizzazione volumetrica, per il bitume "tal quale", si studia a diversi livelli di addensamento (N1 iniziale, N2 medio, N3 finale) come viene descritto dalla normativa UNI EN 12697 – 8 (Tabella 3.8).

	binder			% vuoti (Vm UNI EN 12697-8)
	TQ	Sf	HD	
N1	10	10	10	11-15
N2	100	110	120	3-6
N3	180	190	200	≥ 2

Tabella 3.8. Percentuali di vuoti a diversi livelli di addensamento

### **Studio della compattabilità**

Lo studio della compattabilità, effettuato sui provini in conglomerato bituminoso confezionati mediante pressa giratoria Pine, permette di capire il grado di compattazione dei provini attraverso la determinazione dell'indice CEI (*Compaction Energy Index*).

Nell'indagine sperimentale, i provini sono stati confezionati ad energia imposta fissando il numero di giri a 180 per un bitume tal quale (non modificato con polimeri) come richiesto dal Capitolato. La curva di compattazione, per il calcolo dell'Indice CEI, è stata ottenuta registrando l'altezza del provino in compattazione al giro numero 5, 8, 10 e successivamente ogni cinque giri.

Le miscele che presentano un basso valore di Indice CEI rappresentano una maggiore lavorabilità ovvero tendono ad addensarsi meglio mentre quelle con un alto valore di CEI tendono a rimanere meno compatte. Le miscele in esame devono rappresentare un CEI adeguato tale da non compromettere la compattabilità stessa.

### **Resistenza a trazione indiretta (ITS)**

Ai fini di questo lavoro di Tesi, la caratterizzazione meccanica di miscele in conglomerato bituminoso contenenti e non contenenti lignina è stata resa possibile mediante il parametro di resistenza a trazione indiretta ITS. Tale parametro consente lo studio in termini di resistenza delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso.

Sono stati confezionati quattro provini su ogni miscela per la prova ITS “dry” (Tabella 3.9), i quali sono stati condizionati a 25°C in una camera climatica per 4 ore a valle della prova di resistenza a trazione indiretta (UNI EN 12697 – 23).

Per permettere agli operatori la facile distinzione, i provini confezionati sono stati codificati mediante un codice alfanumerico in cui vengono scritti: la classe del bitume, la tipologia e la percentuale di lignina utilizzata (Figura3.37).

- B.50/70;
- B.70/100\_S\_30;
- B.100/150\_B\_30.



Figura 3.37. Provini condizionati in camera climatica (secondo normativa) ognuno identificato con un codice alfanumerico

Miscela	Curva 1		Curva 2	
	% legante	n° provini compattati a energia imposta (180 giri)	% legante	n° provini compattati a energia imposta (180 giri)
<b>B.50/70</b>	4,2	4	4,8	4
	4,8	4	5,4	4
	5,4	4	-	
<b>B.70/100_S_30</b>	4,8 (3,5)	4	6,4 (4,65)	4
	5,4 (4)	4		
	6,6 (4,8)	4		
<b>B.100/150_B_30</b>	-		5,4 (4)	4
	-		6,4 (4,65)	4

Tabella 3.9. Provini confezionati per ciascuna miscela a diverse percentuali di legante

## Capitolo 4

# Analisi dei risultati

Nel presente capitolo verranno illustrati e analizzati tutti i risultati dell'indagine sperimentale in termini di caratterizzazione volumetrica, lavorabilità (Indice CEI) e resistenza a trazione indiretta mediante grafici e tabelle riassuntive.

Si ricorda che la presente ricerca sperimentale è incentrata sul confronto di due miscele in conglomerato bituminoso ottenute utilizzando leganti modificati con biopolimero lignina e una miscela di riferimento realizzata unicamente mediante bitume tradizionale. In particolare:

- Un bitume tradizionale di riferimento (50/70);
- Due bio-leganti (70/100 modificato con lignina "S" e 100/150 modificato con lignina "B").

### 4.1 Studio del mix design

#### *Ottimizzazione della curva granulometrica e del contenuto di legante bituminoso*

La fase di studio del mix design ha permesso l'ottimizzazione della curva granulometrica per la realizzazione delle miscele in conglomerato bituminoso sulle quali è stato possibile valutare le caratteristiche volumetriche e di compattazione rispettando il fuso granulometrico di riferimento dettato dal Capitolato ANAS per uno strato di binder.

Come primo tentativo combinando le diverse pezzature a disposizione, enunciate nel Capitolo 3 "Aggregati", è stata ottenuta la prima curva granulometrica di progetto, la quale rientra nel fuso di riferimento posizionandosi in prossimità del centro fuso. Le percentuali di leganti utilizzate per il confezionamento delle miscele con tale curva vengono elencate nella Tabella 4.1.

Curva 1	
Miscela	% legante
B.50/70	4,2
	4,8
	5,4
B.70/100_S_30	4,8 (3,5)
	5,4 (4)
	6,6 (4,8)

*Tabella 4.1. Percentuale di legante bituminoso adoperati per ogni miscela mediante la prima curva di progetto*

Si ricorda la differenza tra il bitume 50/70 (con percentuali di solo bitume effettivo) e il bio-legante 70/100\_S ottenuto dall'aggiunta di lignina di tipo "S" al bitume di consistenza più morbida 70/100 (le percentuali tra parentesi indicano il contenuto di solo bitume). Come si evince dalla tabella, in termini di legante la miscela B.70/100\_S\_30 presenta maggiori percentuali ma in realtà contiene meno bitume rispetto al legante di riferimento considerando che una porzione è sostituita dalla lignina.

Dallo studio del tenore dei vuoti effettuato su tali miscele, è emerso che la maggior parte dei valori corrispondenti non rientravano all'interno dei limiti imposti dal Capitolato Anas, pertanto è stato necessario migliorare, in termini di granulometria tale curva, ottenendo così una seconda curva granulometrica di progetto. L'ottimizzazione è stata possibile aumentando la percentuale di aggregato fino a discapito di quello grosso con lo scopo di ottenere un miglior grado di addensamento.

La suddetta ottimizzazione spiega la posizione più elevata della seconda curva rispetto la prima per la presenza maggiore di frazione fina (Figura 4.1).

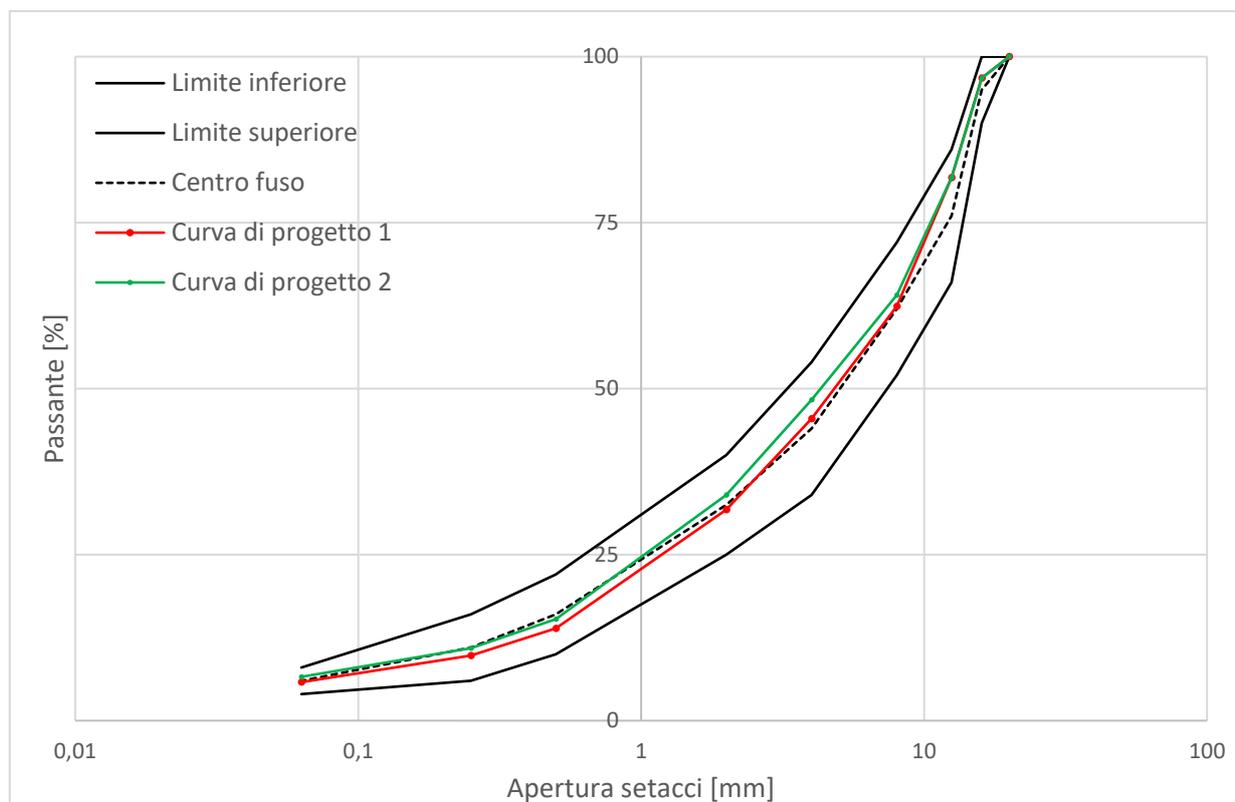


Figura 4.1. Curve granulometriche di progetto a confronto

Le percentuali di leganti utilizzate per il confezionamento delle miscele con la seconda curva di progetto vengono elencate nella Tabella 4.2.

Curva 2	
Miscela	% legante
B.50/70	4,8
	5,4
B.70/100 S_30	6,4 (4,65)
B.100/150	5,4 (4)
B_30	6,4 (4,65)

Tabella 4.2. Percentuale di legante bituminoso adoperati per ogni miscela mediante la seconda curva di progetto

All'interno delle miscele, come precedentemente spiegato nel Capitolo 3 "Aggregati", vi è un 15% di fresato rispetto alla miscela stessa. Tale contenuto è il massimo consentito secondo il capitolato scelto come riferimento, nel caso di impiego di bitumi tradizionali per uno strato di binder. In particolare, per ogni contenuto di legante indagato, lo 0,6% di bitume deriva dal Fresato ipotizzando la sua riattivazione totale

Pertanto, le percentuali di leganti possono essere meglio spiegate come:

- Bitume di riferimento 50/70:
  - 4,8%: di cui 0,6% apportato dal RAP e 4,2% bitume di aggiunta;
  - 5,4%: di cui 0,6% apportato dal RAP e 4,8% bitume di aggiunta;
- Legante bituminoso 70/100 modificato con lignina “S” al 30% rispetto al legante:
  - 6,4%: di cui 0,6% apportato dal RAP e 5,8% legante di aggiunta (di cui 30% lignina + bitume rimanente);
- Legante bituminoso 100/150 modificato con lignina “B” al 30% rispetto al legante:
  - 6,4%: di cui 0,6% apportato dal RAP e 5,8% legante di aggiunta (di cui 30% lignina + bitume rimanente).

Attraverso delle semplici proporzioni si determina che i leganti bituminosi contenenti lignina al 30%, contengono il 4,65% di bitume totale ottenuto dalla somma del bitume di apporto del RAP e quello di aggiunta. Inoltre, la scelta del legante pari al 6,4% consente di ottenere un risparmio del 15% rispetto al 5,4% di bitume scelto per la miscela di riferimento.

### Studio del tenore dei vuoti

La valutazione delle caratteristiche volumetriche dei provini in conglomerato bituminoso, confezionati attraverso pressa giratoria Pine e lasciati raffreddare per un determinato lasso di tempo, è stata realizzata attraverso il metodo “dry”, al fine di confrontare tali risultati con i requisiti di accettazione dettati dal Capitolato ANAS al sottoparagrafo 7.1.8.2. come mostra la Tabella 4.3.

	binder			% vuoti (Vm UNI EN 12697-8)
	TQ	Sf	HD	
N1	10	10	10	11-15
N2	100	110	120	3-6
N3	180	190	200	≥ 2

Tabella 4.3. Percentuali di vuoti per bitumi diversi in uno strato di binder a diversi livelli di addensamento

Il Capitolato afferma che “la verifica della % dei vuoti dovrà essere fatta a tre livelli di n° giri: N1 (iniziale), N2 (medio) e N3 (finale)”. [14]

Nell’indagine sperimentale, per lo studio del tenore dei vuoti per uno strato di binder, è stato adoperato un bitume definito “tal quale” (TQ) ovvero in assenza di polimeri, dunque, si è fatto riferimento alla prima colonna della Tabella 4.3. Questo vale a dire che i provini sono stati compattati

mediante pressa giratoria a “numero di giri imposto” per un totale di 180 giri registrando l’altezza di compattazione al giro numero 5, 8, 10 e successivamente ogni 5 giri per la determinazione del grado di addensamento come previamente spiegato nel Capitolo 3 “Programma sperimentale”.

Nel seguito verranno analizzati i grafici ad istogramma da quanto emerso per lo studio del tenore dei vuoti ai giri numero 10, 100 e 180. Al loro interno le colonne rappresentative sono state suddivise in base al contenuto di legante esaminato per ogni miscela (Figura 4.2.a, b e c).

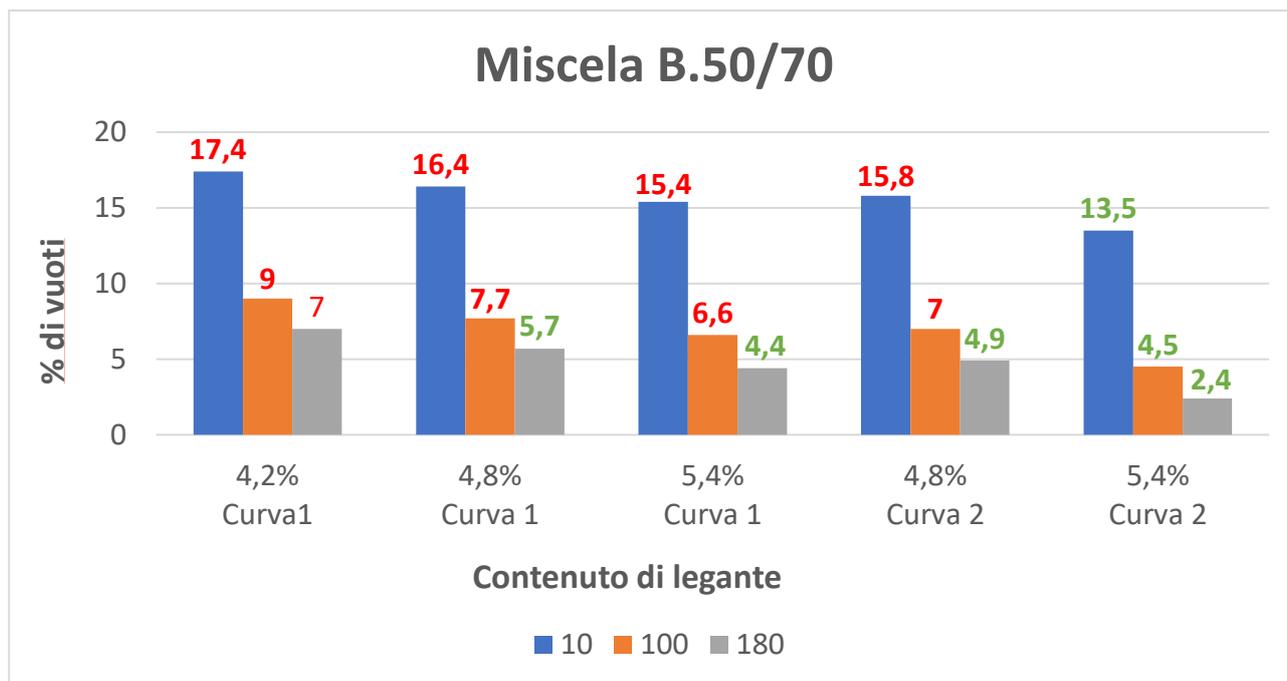


Figura 4.2.a Confronto del tenore dei vuoti ai diversi livelli di addensamento e di contenuto di legante della miscela B.50/70

La Figura 4.2.a mostra i risultati per la miscela codificata come B.50/70. Adottando la prima curva granulometrica di progetto “Curva 1” la maggior parte dei risultati non rientrano nel range di accettazione del Capitolato inerente ai tenori di vuoti ai tre diversi livelli di numero di giri come si può osservare dai valori in rosso sopra le colonne. Per tale motivo, come annunciato previamente, la curva di progetto è stata migliorata ulteriormente ottenendo la “Curva 2” con la quale sono stati confezionati nuovi provini. Inizialmente è stato adoperato un contenuto di bitume pari al 4,8% restituendo valori superiori alle prescrizioni di Capitolato ai livelli di addensamento N1 e N2. Successivamente, il contenuto di bitume è stato aumentato al 5,4% con il quale il tenore dei vuoti rientrava nel range di accettazione per ogni livello di addensamento; in effetti, dall’esperienza si evince che maggiore è il contenuto di bitume e maggiore sarà la tendenza delle miscele a compattarsi e chiudersi meglio.

Un'osservazione importante da fare è che confrontando il contenuto di legante al 5,4% della “Curva 1” con il 5,4% della “Curva 2” si può affermare che l’ottimizzazione della curva di progetto ha permesso una diminuzione del tenore dei vuoti.

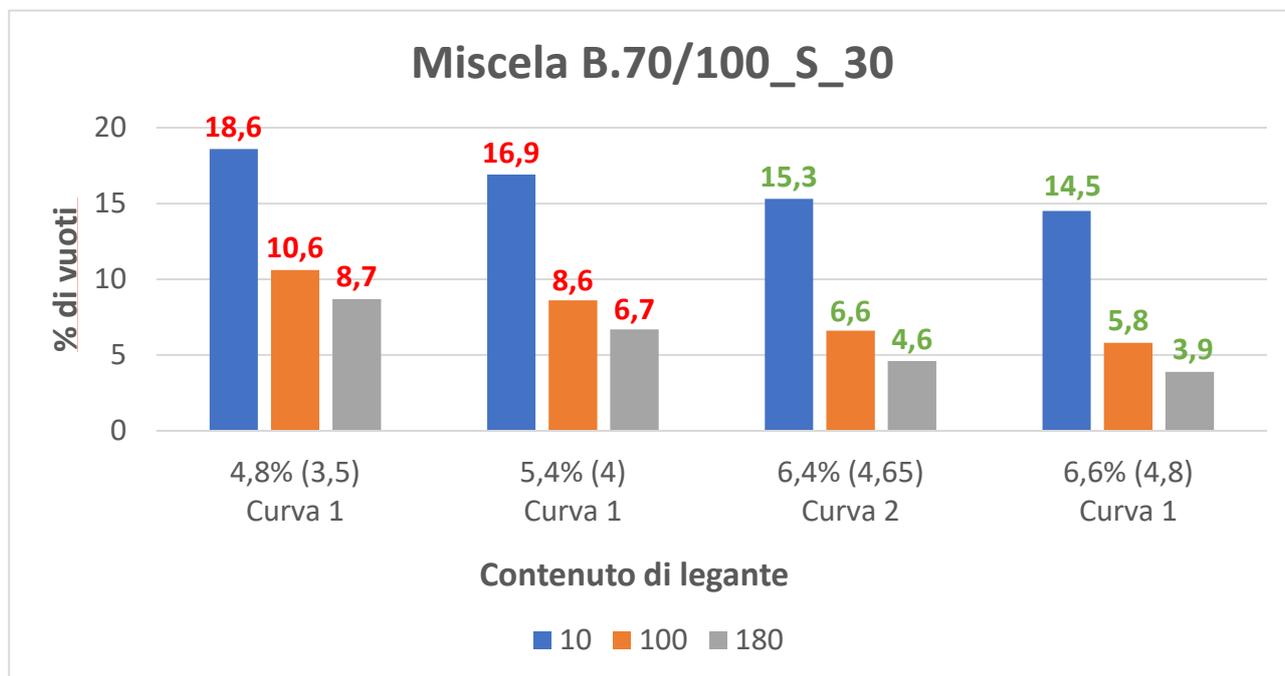


Figura 4.2.b Confronto del tenore dei vuoti ai diversi livelli di addensamento e di contenuto di legante della miscela B.70/100\_S\_30

Nella figura 4.2.b si possono apprezzare i risultati per la miscela codificata come B.70/100\_S\_30. L'unico valore accettabile, in termini di contenuto di legante, per il confezionamento di miscele attraverso la curva di progetto “Curva 1” è stato il 6,6% (contenuto di bitume puro al 4,8%). Mediante la seconda curva ottimizzata “Curva 2” è stato scelto di confezionare miscele con un solo valore di contenuto di legante pari al 6,4% (contenuto di bitume puro al 4,65%) con un risparmio del 15%, in termini di bitume puro, rispetto alla “Curva 1” al fine di ridurre l’impiego del legante bituminoso senza penalizzare le prestazioni.

Tale riduzione restituisce valori del tenore dei vuoti leggermente superiori rispetto alla “Curva 1” (riferito al 6,6%) ma tuttavia accettabili e all’interno del range dei valori di accettazione del Capitolato ANAS.

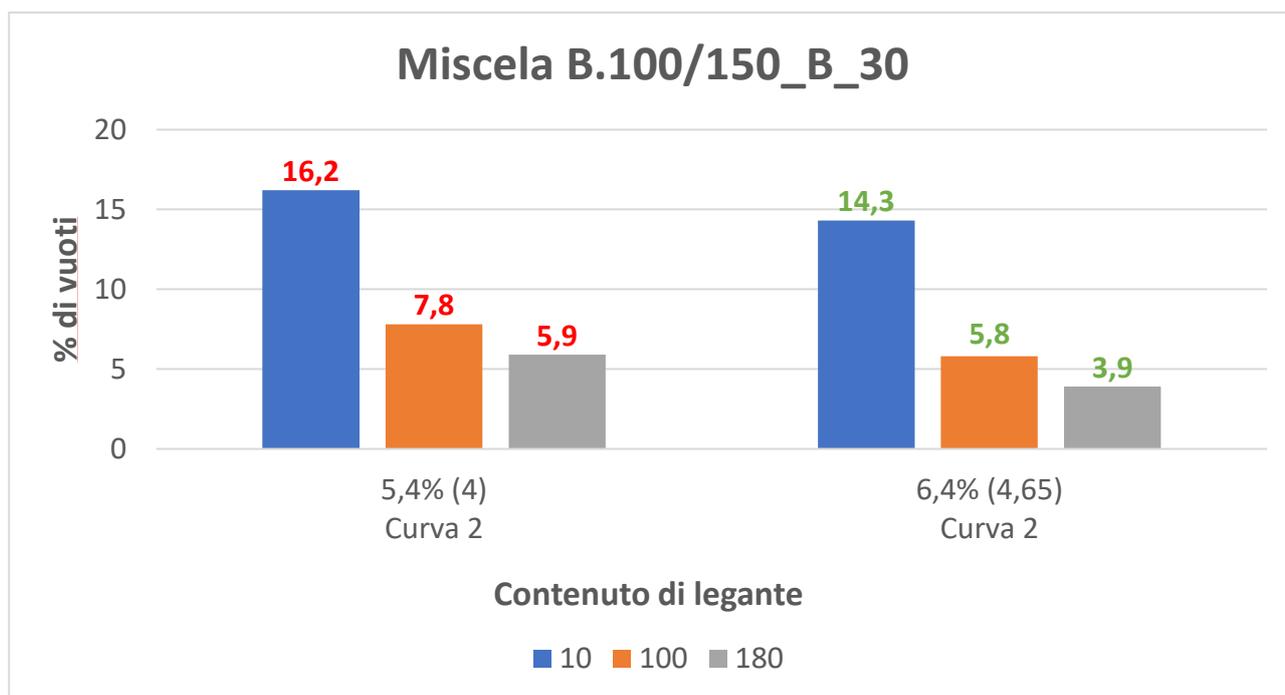


Figura 4.2.c Confronto del tenore dei vuoti ai diversi livelli di addensamento e di contenuto di legante della miscela B.100/150\_B\_30

La Figura 4.2.c rappresenta i risultati per la miscela codificata come B.100/150\_B\_30. Con riferimento solo alla “Curva 2” sono state confezionate miscele con contenuto di legante pari al 5,4% (con valori di tenore dei vuoti superiori rispetto ai limiti imposti dal Capitolato) e con contenuto pari al 6,4% rientrando nei limiti prescritti dal Capitolato ANAS.

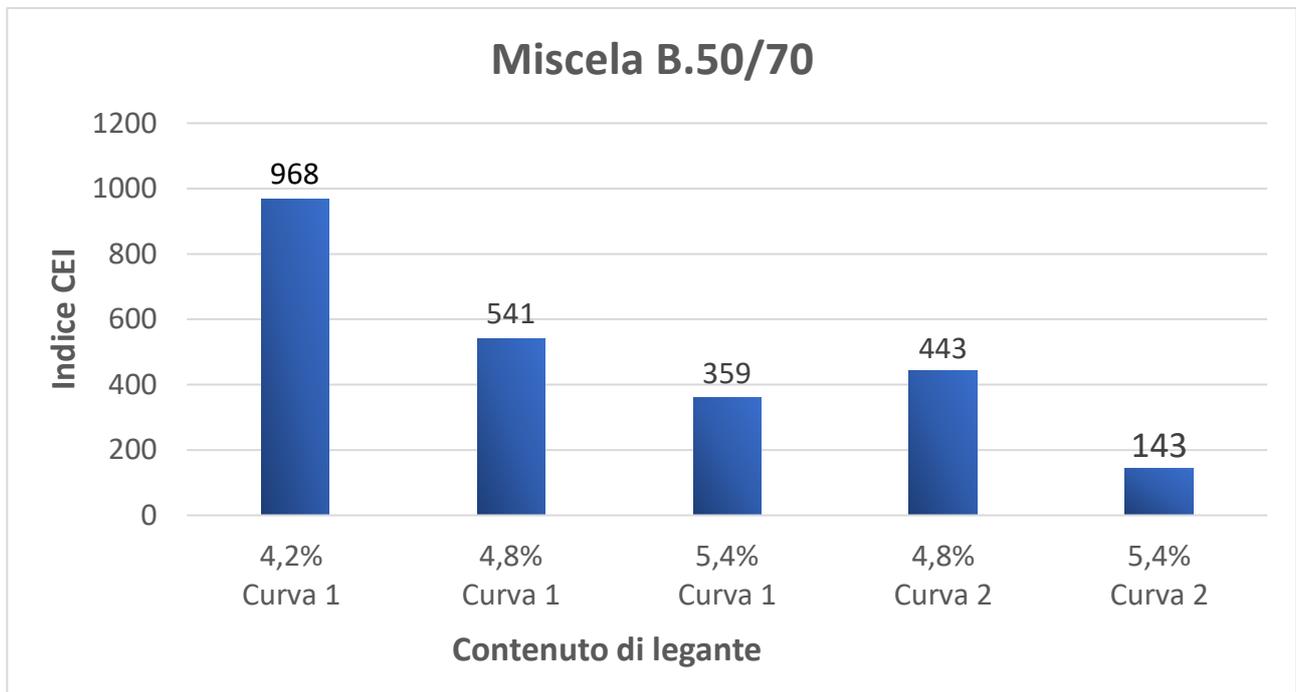
Dunque, l’ottimizzazione della curva granulometrica di progetto “Curva 2” ha permesso di ricavare dei tenori di vuoti accettabili per ogni miscela. Pertanto, in questa fase è stato possibile ottenere l’ottimizzazione del legante per le miscele indagate le quali sono rispettivamente:

- Miscela di riferimento B.50/70: 5,4%;
- Miscela B.70/100\_S\_30: 6,4% (4,65%);
- Miscela B.100/150\_B\_30: 6,4% (4,65%).

### ***Compaction Energy Index (CEI)***

Un altro confronto effettuato, tra la miscela di riferimento prodotta con bitume tradizionale e le miscele prodotte con bio-leganti contenenti lignina, è stato in termini di Indice CEI, che, come spiegato nel Capitolo 3 al paragrafo 3.2.5, è indice della buona compattabilità della miscela. Sebbene il Capitolato non prescriva alcuna limitazione su tale parametro, nell’ottica di raggiungere una buona compattazione è preferibile che l’indice CEI abbia valori non troppo elevati.

Di seguito verranno analizzati i grafici ad istogramma da quanto emerso per lo studio dell'Indice CEI in funzione del contenuto di legante per ogni miscela (Figura 4.3.a, b e c).



*Figura 4.3.a. Confronto Indice CEI a diversi contenuti di legante della miscela B.50/70*

Analizzando la Figura 4.3.a, con riferimento alle miscele prodotte con la “Curva 1”, si nota che il valore dell’Indice CEI diminuisce all’aumentare del contenuto di legante bituminoso all’interno della miscela con un miglioramento in termini di lavorabilità. Tuttavia, le miscele prodotte con la “Curva 2”, a parità di contenuto di legante, presentano una migliore lavorabilità (Indice CEI più basso) rispetto alla “Curva 1”. Questo risultato dimostra ancora una volta che l’ottimizzazione della curva granulometrica di progetto incide positivamente anche sul parametro CEI favorendo ulteriormente la lavorabilità. Con riferimento alla “Curva 2” è stato adottato il contenuto di legante pari a 5,4% come rappresentativo per i successivi confronti.

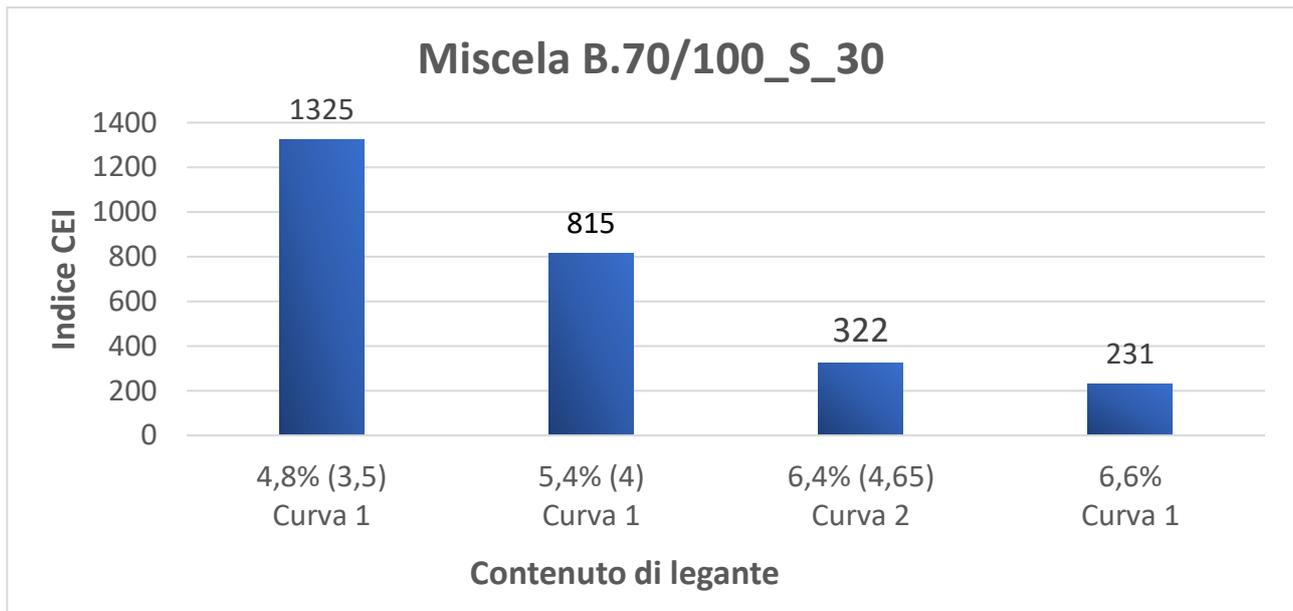


Figura 4.3.b. Confronto Indice CEI a diversi contenuti di legante della miscela B.70/100\_S\_30

Nella figura 4.3.b si possono osservare i valori dell'Indice CEI riferiti alla miscela codificata B.70/100\_S\_30. Da una prima analisi della "Curva 1" si può apprezzare che l'indice diminuisce gradualmente man mano che si aumenta il contenuto di bitume fino al 6,6%. Facendo riferimento alla "Curva 2" si è adottato un valore di contenuto di legante pari al 6,4% con valore dell'indice superiore rispetto al 6,6% della "Curva 1" (322 contro 231). Questo incremento dell'indice può essere giustificato dal fatto che è stato deciso di risparmiare bitume operando per l'appunto con una percentuale inferiore di legante (6,4% invece che 6,6%). Tuttavia, anche se il valore del parametro è superiore risulta accettabile e comparabile con quello delle altre miscele.

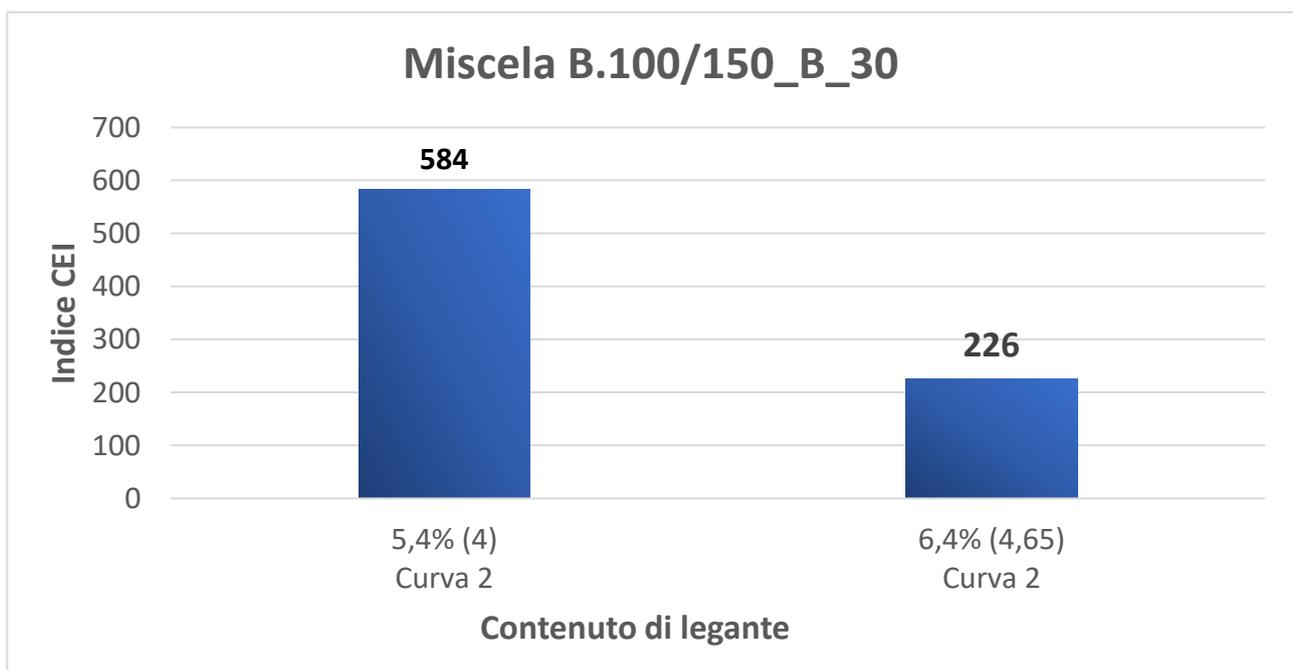


Figura 4.3.c. Confronto Indice CEI a diversi contenuti di legante della miscela B.100/150\_B\_30

Nella figura 4.3.c. vengono indicati i valori di Indice CEI della miscela B.100/150\_B\_30 realizzata attraverso la “Curva 2”. Da una prima osservazione si evince che il valore CEI è estremamente connesso al contenuto di legante effettivo; infatti, maggiore è il contenuto di bitume e minore è il valore CEI, sinonimo di buona lavorabilità.

Inoltre, a parità di contenuto di legante (6,4%) tra la miscela B.70/100\_S\_30 e la miscela B.100/150\_B\_30, l’Indice CEI di quest’ultima risulta inferiore (226 contro 322); questo risultato potrebbe dipendere dal tipo di lignina utilizzata o dalla diversa consistenza del bitume di partenza. Dunque, da questo punto di vista, per produrre bio-leganti contenenti lignina converrebbe utilizzare un bitume più tenero poiché facilità la lavorabilità.

## 4.2 Caratterizzazione meccanica

### *Indirect Tensile Strength (ITS)*

Secondo le prescrizioni di Capitolato, le miscele con bitume “tal quali” (TQ) devono rispettare dei valori indicati nella Tabella 4.4.

	Miscele con bitume TQ	Miscele con bitume SF e HD
Rt (GPa x 10 <sup>-3</sup> )	0,72 – 1,40	0,95 – 1,70
CTI (GPa x 10 <sup>-3</sup> )	≥ 65	≥ 75

*Tabella 4.4. Prescrizioni di Capitolato in termini di resistenza a trazione indiretta e coefficiente a trazione indiretta*

Ai fini di questo lavoro di Tesi, sono state analizzate e confrontate soltanto la resistenza a trazione indiretta (Rt) per le diverse miscele in esame.

Di seguito verranno esposti ed analizzati i valori di resistenza a trazione indiretta mediante grafici ad istogramma in funzione del contenuto di legante (Figura 4.4.a, b e c).

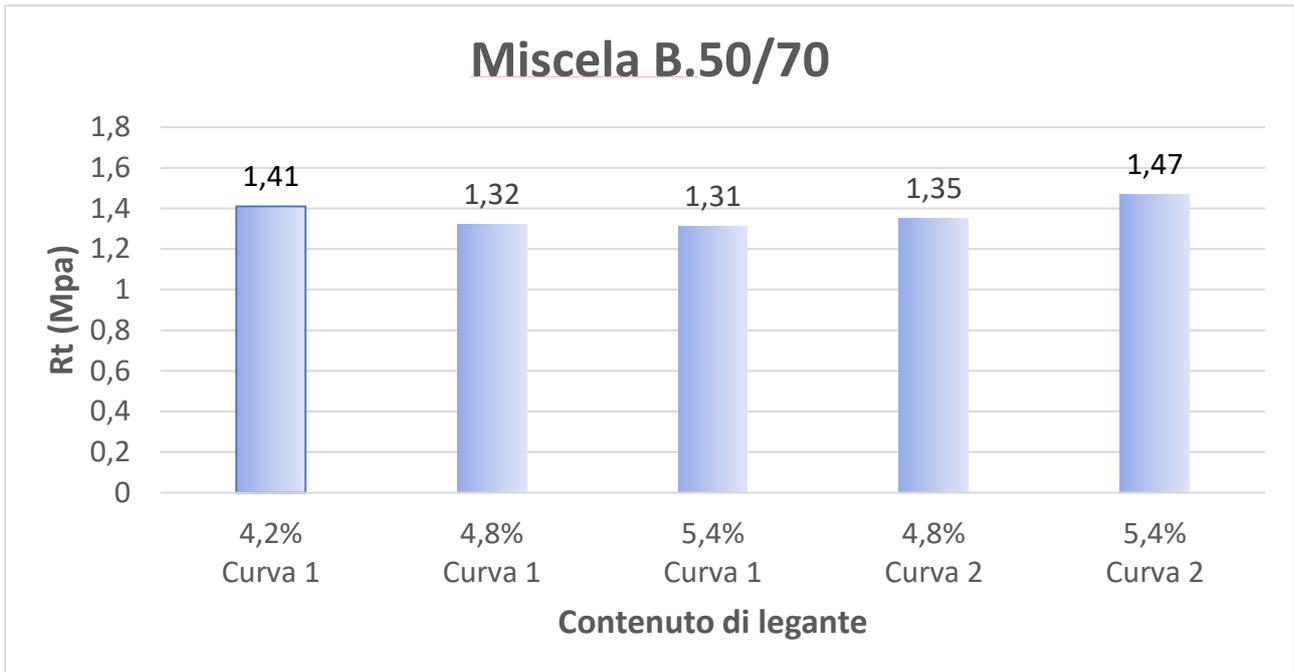


Figura 4.4.a Confronto della resistenza a trazione indiretta a diversi contenuti di legante della miscela B.50/70

La Figura 4.4.a mostra i risultati della miscela di riferimento, codificata come B.50/70, confezionata mediante la “Curva 1” e “Curva 2”. Dai risultati della “Curva 1” si osserva che il valore della resistenza a trazione indiretta diminuisce all’aumentare del contenuto di bitume mentre l’ottimizzazione della curva granulometrica (“Curva 2”) porta con sé un incremento dell’indice Rt. Per un contenuto di legante pari al 5,4% la resistenza è di poco superiore al limite imposto dal Capitolato, tuttavia, può essere assunto come accettabile.

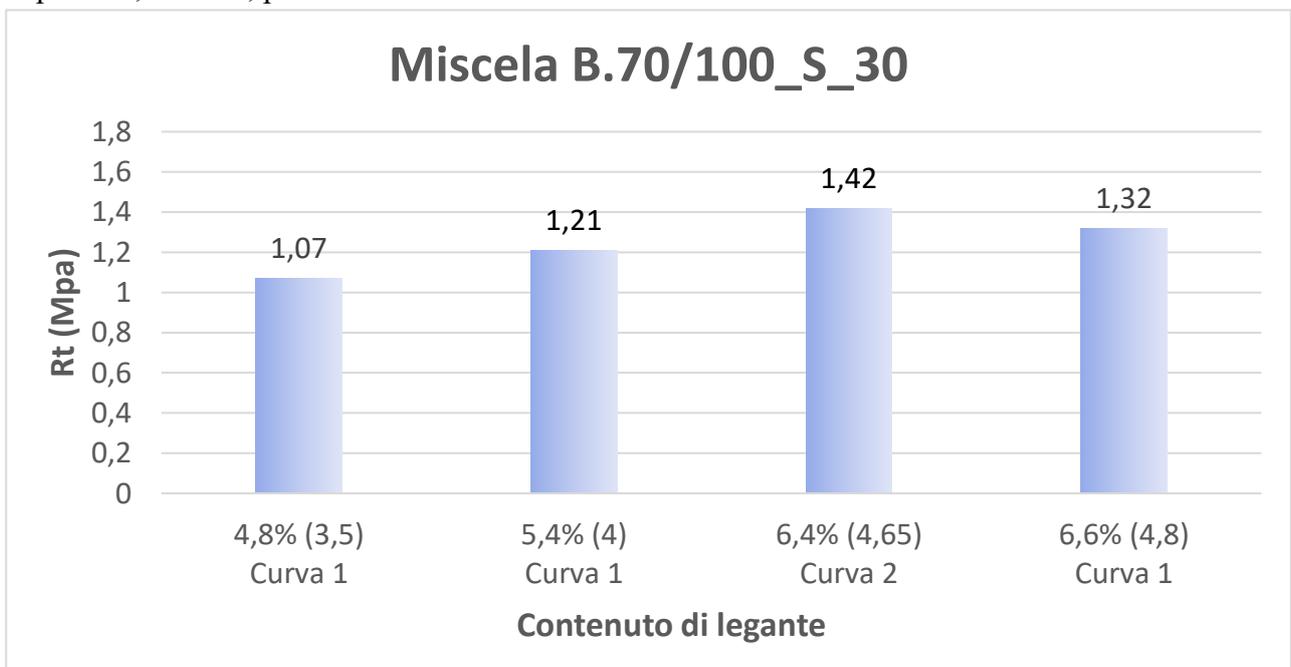


Figura 4.4.b Confronto della resistenza a trazione indiretta a diversi contenuti di legante della miscela B.70/100\_S\_30

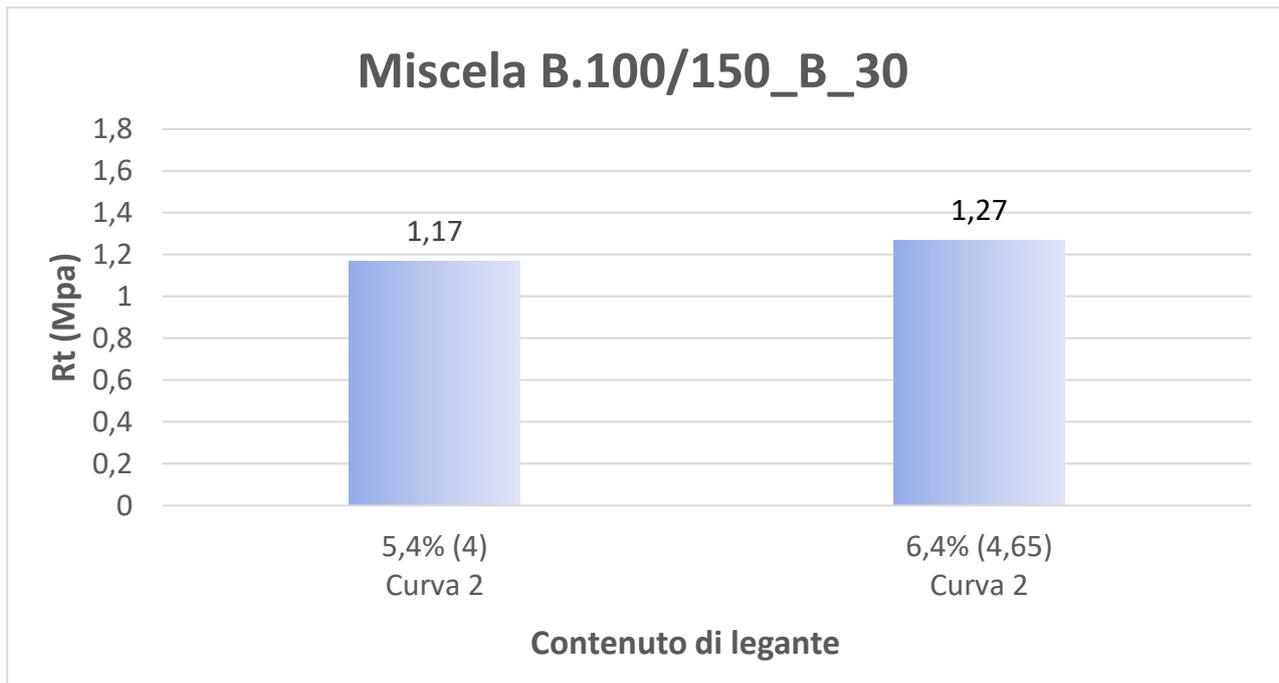
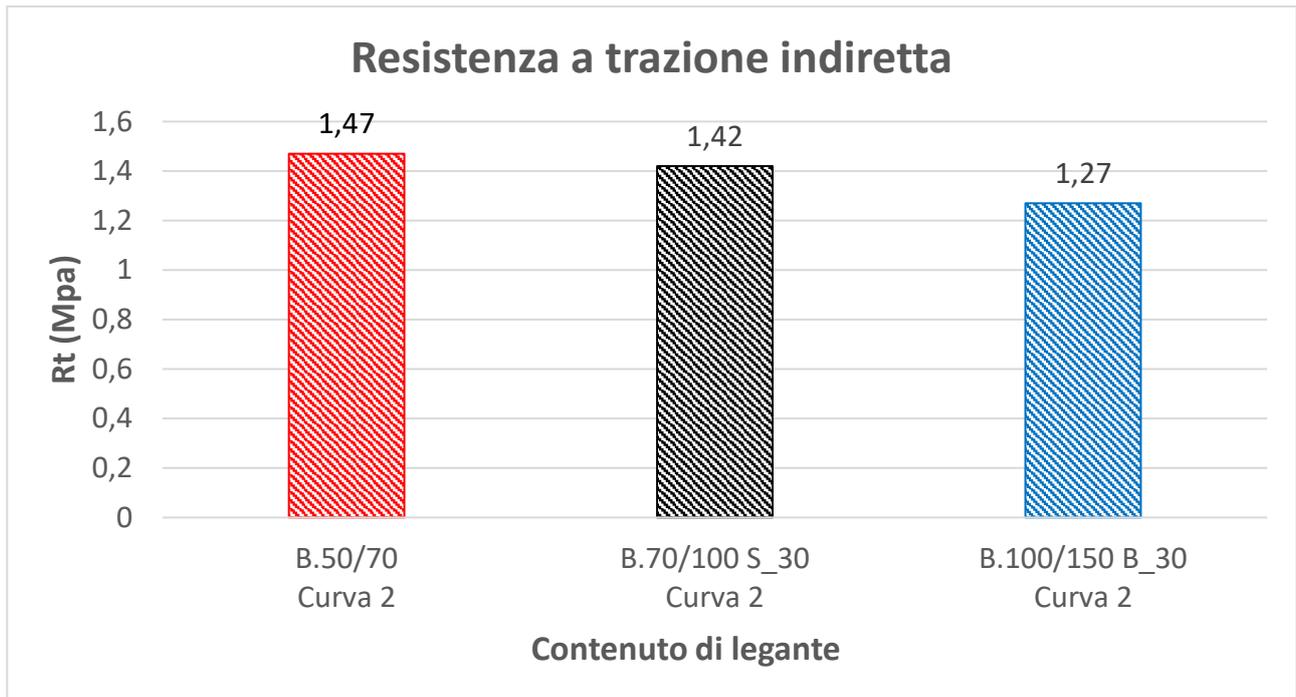


Figura 4.4.c Confronto della resistenza a trazione indiretta a diversi contenuti di legante della miscela B100/150\_B\_30

Le Figure 4.4.b e 4.4.c mostrano i risultati della resistenza a trazione indiretta delle miscele contenenti lignina (codificate come B.70/100\_S\_30 e B.100/150\_B\_30). Nel caso della miscela B.70/100\_S\_30, con riferimento alla “Curva 1”, si nota che ad un incremento di legante effettivo l’Indice Rt tende ad aumentare, contrariamente all’andamento della miscela B.50/70 precedentemente descritta. Questo potrebbe significare che la presenza della lignina tende a incrementare la resistenza a trazione indiretta. Stessa analisi si può osservare nella miscela B.100/150\_B\_30 confezionata solo mediante la “Curva 2” ovvero all’aumentare del legante effettivo l’indice Rt aumenta. Inoltre, si evince che l’ottimizzazione della curva granulometrica di progetto ha restituito un incremento della resistenza a trazione indiretta per entrambe le miscele contenenti lignina.

In seguito, sono rappresentati i valori di resistenza a trazione indiretta con il valore di legante ottimizzato per ogni miscela, adottando la “Curva 2” (Figura 4.5).



*Figura 4.5. Confronto della resistenza a trazione indiretta (Rt) con il valore di legante ottimizzato per ogni miscela esaminata*

Analizzando questi risultati si osserva che la resistenza a trazione indiretta può considerarsi soddisfatta per tutte le miscele. Un'osservazione importante da fare è che nelle miscele confezionate con bio-leganti, la presenza di lignina e il risparmio di bitume comportano prestazioni meccaniche comparabili alla miscela di riferimento.

In questa analisi è fondamentale garantire la verifica del limite inferiore, del range imposto dal Capitolato, piuttosto che il limite superiore, poiché un eccesso di rigidità non è necessariamente penalizzante. Pertanto, per studiare al meglio la risposta del materiale occorre eseguire ulteriori indagini di caratterizzazione meccanica.

# Conclusioni

In tempi attuali, la crescente domanda di risorse esauribili come il petrolio e i suoi derivati, tra cui il bitume, crea la necessità di ricercare fonti di tipo rinnovabile al fine di salvaguardare e garantire la rigenerazione di tali risorse nel tempo. Nel settore delle infrastrutture di trasporto, vari gruppi di ricercatori hanno convogliato i loro studi verso la possibilità di sostituire parzialmente o totalmente il legante bituminoso mediante leganti innovativi denominati bio-leganti, provenienti da risorse rinnovabili (estratti da biomassa o rifiuti organici) più sostenibili da un punto di vista ambientale ed economico.

In tale ottica, il presente lavoro di Tesi ha condotto uno studio di miscele in conglomerato bituminoso contenenti bio-leganti prodotti con lignina. In particolare, lo studio si è concentrato sull'ottimizzazione delle miscele in conglomerato bituminoso confezionate con due bio-leganti (codificati come B.70/100\_S\_30 e B.100/150\_B\_30) messi a punto nell'ambito di un precedente lavoro di Tesi, dalla quale è emerso un dosaggio ottimale di lignina pari al 30%. La presente sperimentazione ha previsto lo studio del mix design, della lavorabilità, del tenore dei vuoti e la valutazione della resistenza a trazione indiretta (ITS). Le bio-miscele sono state confrontate con una miscela di riferimento in cui è stato impiegato un bitume tradizionale di classe 50/70.

Alla luce dei risultati emersi dalla sperimentazione, si evince quanto segue:

- Lo studio di mix design evidenzia la possibilità di ridurre il contenuto di “bitume efficace” del 15%;
- Tale riduzione, dovuta all'introduzione della lignina, non penalizza eccessivamente la lavorabilità, parametro estremamente connesso al contenuto di legante effettivo;
- Da un punto di vista volumetrico, a parità di legante totale, le miscele con lignina risultano essere più aperte rispetto a quelle confezionate con il solo bitume tradizionale, e ciò è dovuto al minor quantitativo di bitume presente; nonostante ciò, la riduzione del 15% di “bitume efficace” garantisce comunque i limiti prescritti;
- La resistenza a trazione indiretta può considerarsi soddisfatta per tutte le miscele confezionate.

A valle di questa sperimentazione, la produzione di miscele con l'impiego di bio-leganti contenenti lignina sembra essere un'ipotesi percorribile nell'ottica di ridurre l'impiego di bitume. Tuttavia, è necessario approfondire l'argomento sottoponendo tali materiali ad una campagna di

caratterizzazione meccanica completa, volta ad un'indagine prestazionale a diverse temperature, condizioni di carico e di invecchiamento.

# References

- [1] Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., & Canestrari, F. (2020). **Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: Towards more sustainable materials in road pavements.** *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(2), 192-204.
- [2] Zarei, A., Zarei, M., & Janmohammadi, O. (2019). **Evaluation of the effect of lignin and glass fiber on the technical properties of asphalt mixtures.** *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(5):4085-4094.
- [3] Airey, G. D., Mohammed, M. H., & Fichter, C. (2008). **Rheological characteristics of synthetic road binders.** *Fuel*, 87(10-11), 1763-1775.
- [4] Zahedi, M., Zarei, A., Zarei, M., & Janmohammadi, O. (2020). **Experimental determination of the optimum percentage of asphalt mixtures reinforced with Lignin.** *SN Applied Sciences*, 2(2), 1-13.
- [5] Zhang, Y., Wang, X., Ji, G., Fan, Z., Guo, Y., Gao, W., & Xin, L. (2020). **Mechanical performance characterization of lignin-modified asphalt mixture.** *Applied Sciences*, 10(9), 3324.
- [6] Xie, S., Li, Q., Karki, P., Zhou, F., & Yuan, J. S. (2017). **Lignin as renewable and superior asphalt binder modifier.** *ACS sustainable chemistry & engineering*, 5(4), 2817-2823.
- [7] Mai, C., Milstein O., & Hüttermann, A. (2000). **Chemoenzymatical grafting of acrylamide onto lignin,** *J. Biotechnol*, 79(2), 173–183.
- [8] Zahedi, M., Zarei, A., & Zarei, M. (2020). **The effect of lignin on mechanical and dynamical properties of asphalt mixtures.** *SN Applied Sciences*, 2(7), 1-10.
- [9] Pan, T. (2012). **A first-principles based chemophysical environment for studying lignins as an asphalt antioxidant.** *Construction and Building Materials*, 36:654-664.
- [10] Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z., & Yu, M. (2020). **High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder.** *Construction and Building Materials*, 230, 117063.
- [11] 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.

- [12] Pérez, I., Pasandín, A. R., Pais, J. C., & Pereira, P. A. (2020). **Feasibility of using a lignin-containing waste in asphalt binders.** *Waste and Biomass Valorization*, 11(6), 3021-3034.
- [13] 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.
- [14] ANAS - S.p.a (2009). **Accordo quadro triennale per l'esecuzione di lavori di manutenzione straordinaria della pavimentazione.** Capitolato Speciale d'Appalto, Norme Tecniche, Allegato D.

# Bibliografia e sitografia

- Capitolato Speciale d'Appalto, ANAS S.p.a;
- ANAS, Gruppo FS Italiane - I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture – Vol.V (2019)
- F.A. Santagata – Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.I: Progettazione (2016)
- UNI EN 12591:2009 Bitumi e leganti bituminosi – Specifiche per i bitumi per applicazioni stradali
- UNI EN 12697-1:2006 Miscele bituminose – Metodi di prova conglomerati bituminosi a caldo – Parte 1: Contenuto di legante solubile
- UNI EN 12697-5:2008 Miscele bituminose – Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 5: Determinazione della massa volumica massima
- UNI EN 12697-6:2012 Miscele bituminose – Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi
- UNI EN 12697-8:2019 Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi
- UNI EN 12697-23:2012 Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi
- UNI EN 12591:2009 Bitumi e leganti bituminosi – Specifiche per i bitumi per applicazioni stradali
- Il bitume: cos'è e come viene evidenziato, <https://geoconsultingitalia.com/bitume-che-cose/>
- Caratterizzazione dei conglomerati bituminosi, Nicolosi V., <https://didattica-2000.archived.uniroma2.it/P&MSV/deposito/Conglomerati-Bituminosi.pdf>
- Le pavimentazioni stradali, Zecchini A., De Grandis U., [http://pqrs-itm.it/images/stories/documenti/Le\\_pavimentazioni\\_stradali.pdf](http://pqrs-itm.it/images/stories/documenti/Le_pavimentazioni_stradali.pdf)
- BioBinder and BioAsphalt mixtures: an overview of our recent publications, Lo Presti D., <https://www.linkedin.com/pulse/biobinder-bioasphalt-mixtures-overview-our-recent-davide-lo-presti>
- Caso sperimentale – “Sostenibilità ambientale e ottimizzazione reologica di un bio-binder da <Waste End> industriali e da filiera alimentare”, Tridico E., <https://tob3.eu/it/sostenibilita-ambientale-e-ottimizzazione-reologica-di-un-bio-binder-da-waste-end-industriali-e-da-filiera-alimentare/>

- Elaborato finale di Petretto F., *“La reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di “aging” in laboratorio”*, Università degli studi di Bologna, [http://amsdottorato.unibo.it/5635/1/Petretto\\_Francesco\\_Tesi.pdf](http://amsdottorato.unibo.it/5635/1/Petretto_Francesco_Tesi.pdf)
- Elaborato finale di Gianvito M., *“Bio-leganti ad uso stradale: Stato dell’arte e sviluppo di casi studio per la valutazione del ciclo di vita”*, <https://webthesis.biblio.polito.it/15191/1/tesi.pdf>