

# Università Politecnica delle Marche



## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

## **Conglomerati bituminosi confezionati con bitume modificato con polverino da PFU**

Hot-mix asphalt manufactured using bitumen modified with crumb rubber from end-of-life tires

TESI DI LAUREA DI

*Leonardo Brasili*

RELATORE

*Prof. Ing. Bocci Maurizio*

CO-RELATORE

*Emiliano Prospero*

Anno Accademico 2020-2021

# **Sommario**

<b>Introduzione</b> .....	5
<b>1. Stato dell'arte</b> .....	7
1.1. Pavimentazioni stradali .....	7
1.2. Conglomerati bituminosi .....	10
1.3. Bitume .....	12
1.4. Bitume modificato .....	19
1.5. Asphalt rubber .....	27
1.6. Impianti di produzione.....	37
1.7. Mix design .....	48
<b>2. Programma sperimentale</b> .....	49
2.1. Materiali .....	50
2.2. Miscelazione e compattazione dei provini .....	61
2.3. Determinazione delle proprietà volumetriche.....	66
2.4. Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM) .....	71
2.5. Prova di trazione indiretta (ITS) .....	78
2.6. Prova di fatica (ITF) .....	82
2.7. Requisiti di capitolato.....	86
<b>3. Analisi dei risultati</b> .....	87
3.1. Analisi granulometrica .....	87

3.2. Analisi volumetrica.....	91
3.3. Confronto delle analisi volumetriche.....	99
3.4. Analisi della prova di trazione indiretta e moduli di rigidezza .....	103
3.5. Confronto risultati ITS e ITSM.....	106
3.6. Analisi prova di fatica.....	112
3.7. Confronto risultati prova ITF .....	114
Conclusioni .....	120
Bibliografia e Sitografia .....	122





# INTRODUZIONE

L'infrastruttura stradale è un'opera di ingegneria destinata alla circolazione di persone, animali e veicoli, ove la mobilità in condizioni di sicurezza, efficienza ed economicità, è garantita da un insieme di componenti fisiche come ad esempio carreggiate, marciapiedi, scarpate etc. I principali fattori che ne determinano la struttura e la geometria sono la natura, il tipo e l'intensità del traffico, non solo quello veicolare, ma anche le caratteristiche dell'ambiente e del contesto in cui si inserisce, nonché la morfologia e l'idrogeologia del territorio attraversato. Dalle scelte progettuali, scaturiscono gli importi di spesa necessari da sostenere per la sua realizzazione. Importi che devono essere correttamente valutati e attentamente ponderati, considerandone l'ammissibilità in relazione agli strumenti di pianificazione economica e territoriale. In tal senso il finanziamento deve essere commisurato all'ottimizzazione del rapporto tra costi e benefici attesi, entrambi intesi in forma generalizzata e attualizzata, cioè valutati rispetto a tutte le diverse implicazioni economiche e rapportati a un definito orizzonte temporale.

Le pavimentazioni stradali possono essere costruite utilizzando principalmente due materiali: il cemento o il bitume. La prima tipologia è detta pavimentazione rigida (tipica delle aree aeroportuali) la seconda invece è detta pavimentazione flessibile.

Nell'ambito della progettazione delle pavimentazioni flessibili, uno degli elementi più critici è quello di individuare il materiale più idoneo a fornire le prestazioni necessarie per la funzione che deve assolvere. Numerosi studi hanno dimostrato che l'aggiunta di polimeri al legante e la definizione di un preciso assortimento granulometrico contribuiscono a rendere la miscela molto più performante.

Gli altri agenti di modifica sono: le gomme provenienti dal riciclo di pneumatici, i filler, le cere paraffiniche, le fibre, i catalizzatori.

Il vantaggio dei conglomerati bituminosi posati con bitume modificato è la loro maggiore resistenza, necessitando di conseguenza di minori interventi per la manutenzione e quindi meno impatto ambientale e disagi per il traffico.

Lo studio effettuato nella seguente tesi, si basa sull'utilizzo di conglomerati bituminosi con quattro bitumi modificati che hanno lo scopo di combinare ad elevati standard prestazionali, la riduzione dell'impatto ambientale in fase realizzativa e manutentiva.

I quattro bitumi modificati sono:

- A. A: bitume 70/100 additivato con SBS e compound in rapporto 60/40 (5% in peso sul bitume)
- B. B: bitume 70/100 additivato con SBS e compound in rapporto 80/20 (5% in peso sul bitume)
- C. C: bitume 70/100 additivato con SBS
- D. D: bitume 70/100 additivato con compound (6% in peso sul bitume)

Il compound è costituito da polimeri SBS, in forma lineare oppure in forma radiale, olio e polverino di gomma in parti uguali.

Il dosaggio del compound è scaturito dall'obiettivo di ottenere un punto di rammollimento di oltre 70 °C ed un ritorno elastico di oltre il 75%, come normalmente avviene per i bitumi modificati con polimeri di tipo hard.

La seguente tesi si sviluppa nei seguenti capitoli:

➤ Capitolo 1 – STATO DELL'ARTE

Viene descritto il conglomerato bituminoso modificato con polimero e polverino di gomma, partendo dal conglomerato bituminoso standard.

➤ Capitolo 2 – INDAGINE SPERIMENTALE

Viene presentato il programma sperimentale, le caratteristiche delle miscele, la descrizione delle prove eseguite e l'analisi dei dati.

➤ Capitolo 3 – ANALISI DEI RISULTATI

Si riportano i risultati ottenuti dalle prove sperimentali confrontando, attraverso l'ausilio di grafici e tabelle opportunamente presentati e commentati, il comportamento meccanico/reologico delle miscele studiate.

➤ CONCLUSIONI

# CAPITOLO 1: Stato dell'arte

## 1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI

Con il termine sovrastruttura stradale, detta più comunemente pavimentazione, si intende quella struttura, che può poggiare su un rilevato, essere collocata in trincea o posta direttamente sul terreno in sito, costituita da un insieme di materiali e spessori differenti. I materiali hanno caratteristiche fisiche e meccaniche diverse, scelti a seconda della funzione che tali strati assolvono all'interno della struttura e a seconda del tipo di sollecitazione prevalente, in modo da garantire la transitabilità dei veicoli. Tale composizione deriva da considerazioni di tipo economico: ogni strato è costituito dal materiale più idoneo a rispondere alle sollecitazioni indotte dal traffico, la cui entità decresce dall'alto verso il basso. Invece per quanto riguarda gli strati, si distinguono in base a tre funzioni fondamentali:

- ripartire sul terreno di sottofondo le azioni statiche e dinamiche dei veicoli in misura tale da non determinare deformazioni permanenti del piano viabile, decisamente dannose per il comfort e per la sicurezza del trasporto (compatibilità delle azioni dei carichi con la portanza del sottofondo);
- garantire la sicurezza della circolazione in relazione ai problemi di aderenza pneumatico-pavimentazioni eliminando le acque meteoriche dalla superficie e proteggendo il terreno di sottofondo e la stessa sovrastruttura, evitando il dilavamento, le azioni del gelo e disgelo e depositi di gomma;
- formare una struttura stabile nel tempo e poco deformabile in grado di sopportare i carichi ripetuti applicati dai veicoli e tale da assicurare un adeguato confort di marcia;

La pavimentazione stradale viene realizzata per strati, ciascuno ha un differente compito all'interno del sistema della sovrastruttura:

- Fondazione: si realizza sopra al sottofondo e la sua funzione è quella di trasmettere i carichi a quest'ultimo (misto granulare)
- Base: costituisce la struttura della pavimentazione e ripartisce i carichi di traffico (conglomerato bituminoso o misto cementato)
- Binder: collegamento tra base e tappeto d'usura che garantisce la regolarità (conglomerato bituminoso)

- Tappeto d'usura: deve fornire regolarità e aderenza considerando che è il più esposto a deformazioni e usura (conglomerato bituminoso).

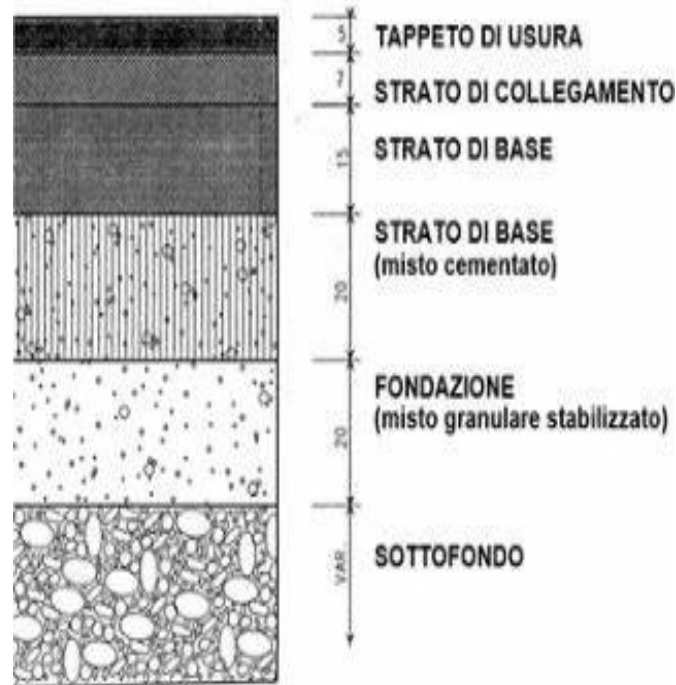


Figura 1: esempio di pavimentazione stradale

Ci possono essere altri strati, chiamati strati accessori:

- Strato anticapillare: strato di spessore modesto e posto tra lo strato di fondazione e il sottofondo (strade in trincea), con la funzione di interrompere l'eventuale risalita capillare di acqua proveniente da falda acquifera;
- Strato antigelo: strato posto tra quello di fondazione e il sottofondo, ovvero ottenuto aumentando lo spessore della fondazione, con la funzione di impedire che la profondità di penetrazione del gelo raggiunga il sottofondo se gelivo;
- Strato drenante: strato costituito da materiale granulare ad elevata permeabilità, con la funzione di raccogliere e smaltire le acque di falda o di infiltrazione verso i fossi laterali o altro dispositivo drenante.

In base alle miscele utilizzate e agli strati realizzati, si identificano una vasta gamma di sovrastrutture stradali e la scelta tipo logica costituisce oggetto stesso della progettazione. Semplificando, per chiarezza espositiva, è possibile identificare due principali tipologie di pavimentazioni, comunemente indicate come flessibili e rigide.

La pavimentazione flessibile è caratterizzata dalla presenza di un insieme di strati in conglomerato bituminoso poggianti su uno strato di fondazione in materiale granulare.

La pavimentazione rigida consiste invece in lastre in conglomerato cementizio poste direttamente sul sottofondo o su uno strato intermedio di fondazione anch'esso in materiale granulare, legato o non. La distinzione tra flessibile e rigida riguarda essenzialmente le modalità di trasmissione dei carichi al sottofondo. Da un punto di vista ideale, un strato flessibile realizza una trasmissione uniforme delle tensioni a cui corrisponde una distribuzione non uniforme delle deformazioni, mentre per uno strato rigido si verifica il caso contrario.

Nella realtà, lo stato tenso-deformativo effettivo dipende dalla rigidezza relativa dei materiali impiegati nella sovrastruttura rispetto a quelli utilizzati nello strato di supporto (sottofondo). Tale rapporto è relativamente ridotto nel caso dei conglomerati bituminosi rispetto ai conglomerati cementizi, da ciò deriva l'uso dei termini flessibile o rigida. La pavimentazione composita invece è data dalla combinazione di strati rigidi e flessibili.

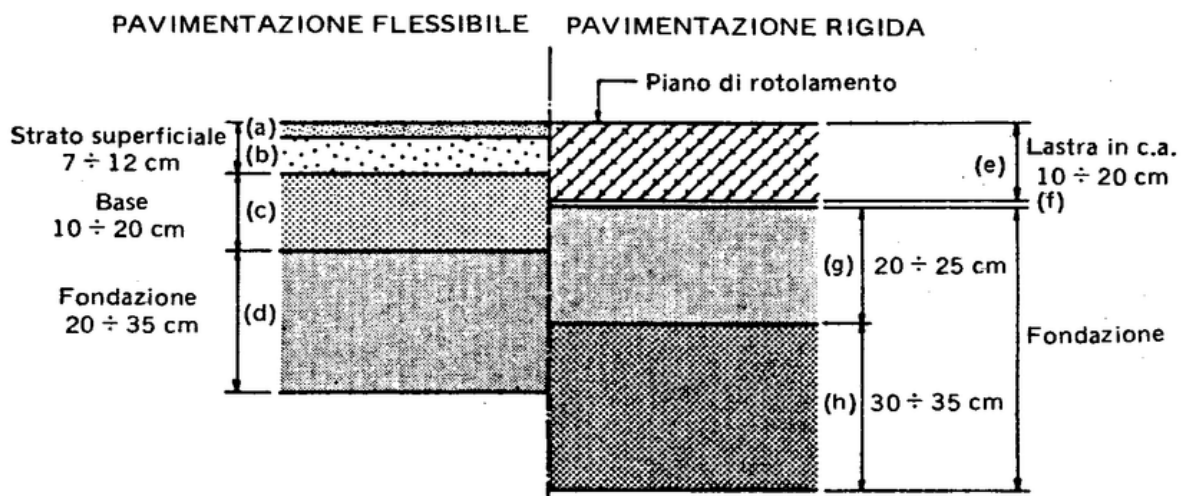


Figura 2: differenza tra pavimentazione rigida e flessibile

## **1.2 CONGLOMERATO BITUMINOSI**

I conglomerati bituminosi sono materiali compositi ottenuti dalla miscelazione di aggregati lapidei, legante bituminoso, filler, ed eventuali additivi. Il campo di impiego più diffuso dei conglomerati bituminosi è di gran lunga quello delle pavimentazioni flessibili o semirigide, sebbene siano da annoverare anche altre applicazioni quali, per esempio: i manti di ricoprimento di lastre rigide in calcestruzzo (pavimentazioni composite) o i sub-ballast ferroviari.

Limitando l'attenzione al primo caso, i conglomerati presentano caratteristiche differenti in relazione allo strato della pavimentazione cui sono destinati: caratteristiche volumetriche, proprietà meccaniche e composizione.

Gli aspetti principali legati alla composizione riguardano l'assorbimento granulometrico degli aggregati e il dosaggio del legante.

La miscela lapidea deve rispettare opportuni limiti dimensionali in modo da rientrare all'interno di un fuso granulometrico definito sulla base di una curva di distribuzione ottimale e di predefinite tolleranze. Nei materiali di tipo tradizionale, si fa riferimento alla formulazione di Fuller dove si adotta un diametro massimo più elevato per gli strati di base e valori via via decrescenti per quelli superiori, caratterizzati da un assortimento più fine. Nel sistema SUPERPAVE, i limiti granulometrici sono indicati mediante dei punti di controllo, ricavati sperimentalmente rispetto alla retta di massima densità e stabiliti in funzione del diametro nominale massimo.

Il filler, pur costituendo una frazione specifica (passante al vaglio di apertura a 0.075 mm oppure 0,063 mm) della distribuzione granulometrica degli aggregati, viene considerato come un componente a sé stante e infatti all'atto della produzione viene aggiunto separatamente rispetto alle restanti classi di aggregato, tramite una linea dedicata. Esso realizza un'intima unione con il legante per formare il cosiddetto mastice bituminoso, che avvolge la fase lapidea e fornisce coesione all'intera miscela.

In generale, un incremento della percentuale di filler determina una riduzione del contenuto ottimale di bitume, un aumento della densità finale della miscela, della sua stabilità e rigidità. Di contro, se dosato in quantità eccessiva compromette le caratteristiche di lavorabilità e comporta un incremento considerevole della superficie specifica degli aggregati, con conseguente riduzione dello spessore della pellicola legante che può esporre il materiale a un processo di ossidazione più repentino e a problemi di perdita di adesione.

La distribuzione dei granuli influenza anche il contenuto di bitume, espresso generalmente in valore percentuale rispetto al peso degli aggregati. La quantità ottimale deve essere tale da ricoprire, con una pellicola legante di spessore adeguato, la superficie complessiva di tutte le particelle; ciascuna tipologia di spessore aggregato è caratterizzato da una propria superficie specifica la quale, in linea di massima, cresce al decrescere della sua dimensione media. La determinazione del dosaggio di effettivo impiego avviene attraverso la procedura di mix design.

Gli additivi, infine, sono costituiti da prodotti naturali o artificiali che aggiunti alle altre componenti consentono di migliorare le prestazioni complessive del materiale.

Il loro dosaggio varia a seconda delle condizioni di impiego, della natura degli aggregati e delle caratteristiche del prodotto e va anch'esso definito nell'ambito dello studio di miscela.

### 1.3 BITUME

Come definito dalla norma UNI EN, “il bitume è un materiale virtualmente non volatile adesivo e impermeabile derivato da petrolio grigio oppure presente nell’asfalto nativo; completamente o quasi solubile, molto viscoso o quasi solido a temperature ambiente”.

In un conglomerato bituminoso, il bitume ha la funzione di conferire alla miscela la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute ai carichi superficiali indotti dal passaggio degli pneumatici (carico di traffico).

Esso deriva dai processi di raffinazione del petrolio grezzo. Il processo di produzione più comune è quello della distillazione frazionata mediante il quale si ottiene il frazionamento del grezzo, sfruttando le differenze esistenti fra le temperature di ebollizione dei suoi vari componenti (figura 3). Lo si inserisce nella colonna di frazionamento, dove le componenti con temperature di ebollizioni minori cominciano ad evaporare e a risalire nella colonna. Dunque, le frazioni più volatili si distribuiscono sui piani più in alto nella colonna, mentre il deposito delle frazioni in basso costituisce il “residuo atmosferico” che viene usato per riprodurre il bitume.

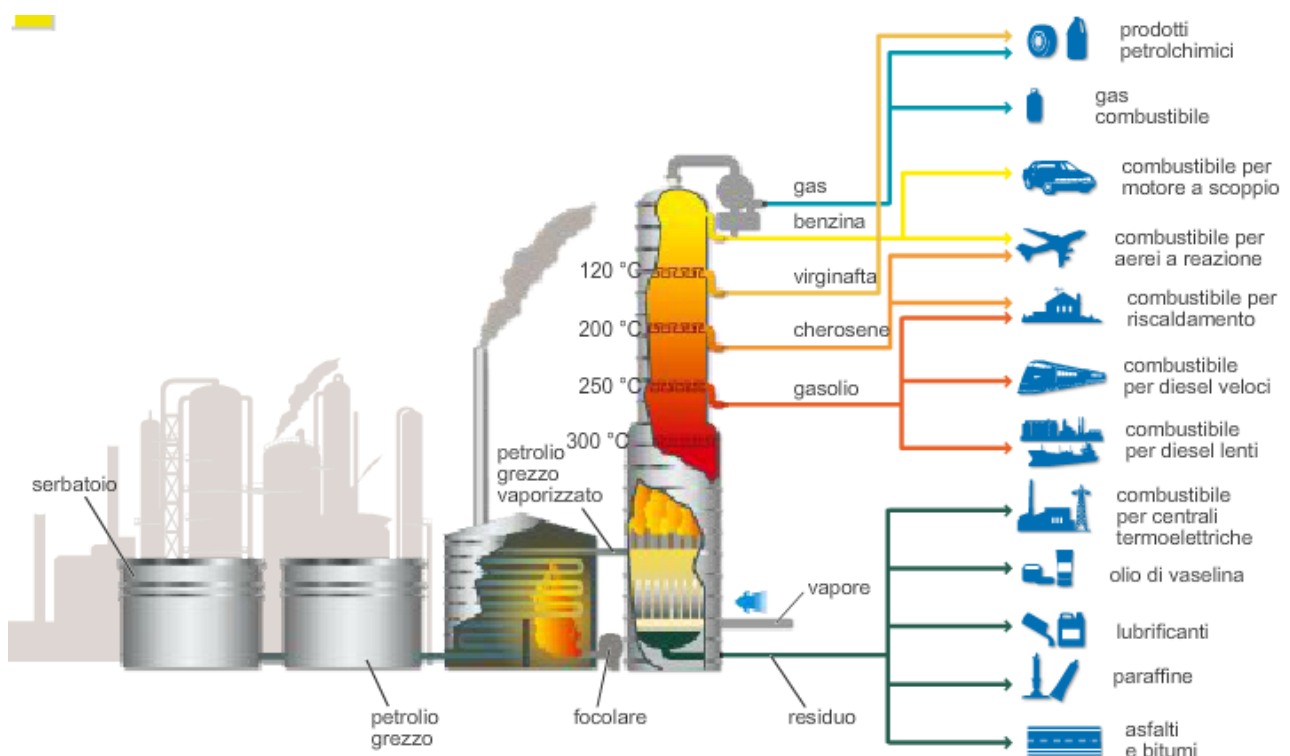


Figura 3: processo raffinazione



Pur rappresentando la componente nettamente minoritaria del conglomerato (circa il 5% in peso rispetto agli aggregati), le sue caratteristiche influenzano in maniera altrettanto importante, quanto quelle dell'aggregato, quanto le proprietà finali della miscela in conglomerato.

Le proprietà del bitume variano a seconda della temperatura cui risulta sottoposto; ciò permette di ottenere un materiale semiliquido alle temperature di miscelazione e compattazione e semisolido alla temperatura di esercizio. A temperatura ambiente, ha un colore scuro che va dal nero al bruno scuro ed ha come caratteristiche principali quelle di essere: termoplastico e molto aderente. Questo materiale si presenta come un complesso di miscele varie che sono per la maggior parte idrocarburi e in più vi è la presenza di composti organici come l'ossigeno, l'azoto e lo zolfo la cui percentuale varia dall'1 al 10%. La restante parte viene occupata per l'80% dal carbonio e il 10% dall'idrogeno. Con l'ossidazione il bitume può perdere gran parte delle sue proprietà, andando incontro all'invecchiamento e perdendo al contempo la propria elasticità.

Le proprietà meccaniche e fisiche del bitume sono strettamente legate alla sua composizione chimica, fisica e strutturale. Dal punto di vista chimico-fisico, il bitume può essere rappresentato come un sistema multifase che comprende una componente oleosa (saturi e aromatici) all'interno della quale sono disperse sostanze insolubili dette asfalteni. L'insieme di saturi, aromatici e resine viene definita "malteni".

Ciascuna componente svolge una specifica funzione: gli asfalteni 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 ed influiscono sul suo comportamento ad elevate temperature conferendogli la capacità di ricoprire estese superfici di altro materiale.

Essi sono impermeabili all'acqua e proprio per questo motivo vengono largamente utilizzati per creare dei rivestimenti, avendo anche allo stesso tempo, un alto potere adesivo e di coesione.

Le resine sono composti solubili, viscosi a temperatura ambiente e con notevoli proprietà adesive, svolgendo un'azione disperdente degli asfalteni, conferendo flessibilità e duttilità al bitume quando sottoposto a sollecitazioni.

È quasi impossibile che possano esistere due tipi di bitume con la stessa identica composizione chimica, in quanto essa dipende dal tipo di origine e dagli eventuali processi di raffinazione a cui il greggio è stato sottoposto.

Esiste poi, una scienza, che studia gli equilibri raggiunti nella materia deformata per effetto di sollecitazioni, chiamata reologia. Essa è una prova razionale, che studia il comportamento tenso-deformativo di un materiale in funzione della temperatura.

Il comportamento reologico del bitume dipende dallo stato di aggregazione delle miscele e dunque dal rapporto tra asfalteni, malteni e resine e si modifica al variare della temperatura:

- Per ogni bitume esiste una temperatura ( $T^*$ ) tale che per  $T > T^*$  il comportamento reologico possa essere associato a quello di un materiale incapace di resistere staticamente a forze di taglio rappresentato da un fluido;
- Esiste una temperatura ( $T_g$ ) detta temperatura di transizione vetrosa tale che per  $T < T_g$  il comportamento reologico possa essere associato a quello di un solido;

Nel tempo, il bitume tende a "invecchiare": si parla di invecchiamento a breve e lungo termine. Quello a breve termine è legato all'esposizione del legante ad elevatissime temperature durante le fasi di miscelazione e posa in opera (superiori a  $130^\circ\text{C}$ ). Quello a lungo termine si manifesta invece in sito durante tutto l'arco della vita utile della pavimentazione ed è fondamentalmente determinato dall'esposizione del materiale agli agenti atmosferici. In ambo i casi, il bitume subisce fenomeni di ossidazione che comportano la perdita delle componenti volatili più leggere (malteni). Conseguentemente, il legante risulta progressivamente più ricco di asfalteni (la componente più dura e consistente) e tende quindi a diventare più rigido, ma anche potenzialmente più fragile e maggiormente esposto al fenomeno della fessurazione.

Questa peculiarità risulta particolarmente rilevante nell'ottica del recupero del materiale fresato derivante dalla demolizione di vecchie pavimentazioni per il confezionamento di nuovo conglomerato tramite tecnica di riciclaggio a caldo.

Esponendo il materiale fresato ad alta temperatura durante la miscelazione con gli aggregati vergini e il bitume di aggiunta, parte del legante che lo ricopre tende a "riattivarsi" e si miscela con il bitume vergine. Il bitume riattivato proveniente da fresato è però un bitume che ha subito tutti i processi di invecchiamento e presenta pertanto caratteristiche alterate rispetto a quelle possedute inizialmente.

Successivamente, 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.

Per bilanciare l'irrigidimento apportato dal bitume riattivato del fresato, oltre all'impiego di specifici additivi "rigeneranti" che mirano a ripristinare le caratteristiche del bitume

"invecchiato", occorre tarare opportunamente la scelta del bitume vergine di aggiunta: esso dovrà essere più "soffice" per compensare almeno parzialmente l'effetto irrigidente del bitume riattivato. La scelta è anche funzione della quantità di materiale fresato che si intende inglobare nella miscela.

Per permettere una classificazione e un controllo qualitativo del bitume devo realizzare delle prove:

1. Prova di penetrazione: consente di vedere la durezza del bitume attraverso la misura dell'affondamento di un ago all'interno di un campione di bitume posto alla temperatura di 25°C.

Per prima cosa si prende un campione di bitume e si cola in un bicchierino e si mette in stufa a 25°C per un'ora in modo da avere una temperatura del campione omogenea. Dopodiché si infligge un ago sulla superficie di bitume e tramite una lente si vede il contatto. Si lascia cadere l'ago con un carico di 100 gr per un tempo di 5 secondi e ripeto per tre volte. Il risultato poi è la media di questi tre risultati. Quanto più il bitume è molle tanta più la penetrazione sarà elevata; attraverso questa prova si può operare una classificazione tecnico commerciale dei bitumi in base al loro grado di durezza come intervallo di valori. Per esempio un bitume classificato 50/70 ha una penetrazione compresa tra 50 e 70 decimillimetro;



*Figura 4: Prova di penetrazione*

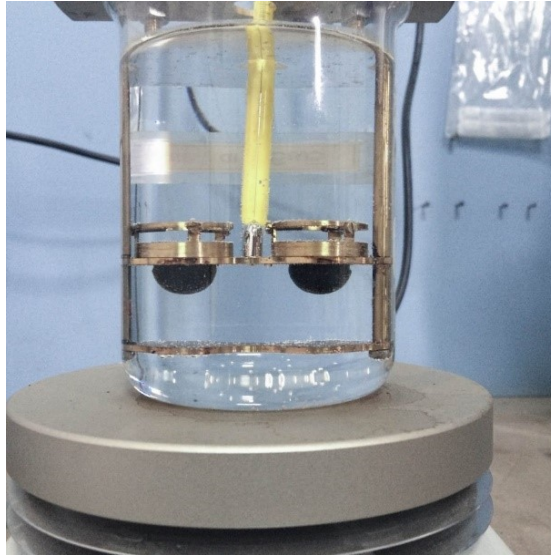
2. Prova fraass: il bitume al diminuire della temperatura diventa fragile. Lo scopo della prova è misurare la fragilità di un bitume a bassa temperatura, tramite la determinazione del punto di rottura per flessione ciclica con metodo standardizzato. Il punto di rottura Fraass, cioè la temperatura alla quale si presenta la rottura, evidenzia la resistenza meccanica del bitume alle basse temperature. L'intervallo di temperatura compreso tra il punto di rottura Fraas e il punto di rammollimento viene definito come "intervallo di elastoplasticità" nel quale il bitume varia il suo comportamento.

Si spalma il bitume su una piastrina in acciaio, si misura la temperatura e si mette il tutto in un contenitore refrigerante. Ogni minuto si gira una manovella che influenza la piastrina per vedere se il bitume segue la deformazione di essa, fino a portarlo al limite della sua resistenza. La temperatura di rottura del bitume, coincide con la situazione ambientale, dove il bitume non deve essere utilizzato perché fragile;



*Figura 5: Prova fraass*

3. Palla anello: si basa sulla determinazione del punto di rammollimento [ $^{\circ}\text{C}$ ] del bitume in un intervallo di temperatura tra 30 e 150 $^{\circ}\text{C}$ . Fornisce una stima del punto di passaggio da uno stato visco-elastico a uno puramente viscoso. La prova prevede che si coli il bitume in due anelli e si ponga una biglia su di esso che lo trascinerà in basso. Il tutto viene messo in un becker e successivamente riempito di acqua a 5 $^{\circ}\text{C}$  e poi riscaldata di 5 $^{\circ}\text{C}$  al minuto. Aumentando la temperatura, il bitume diventa più morbido, fino a quando la biglia porterà il bitume in basso al punto da toccare il fondo e infine si misurerà la temperatura dell'acqua;



*Figura 6: Prova palla anello*

4. Prova di duttilità: consente al bitume di deformarsi senza rompersi, opponendosi alla fragilità. La prova prevede che si coli il bitume in alcuni stampi, i quali vengono inseriti in una vasca con dell'acqua; successivamente vengono misurate le caratteristiche a trazione del bitume ad una temperatura di 5 o 25°C in base alla durezza del campione;



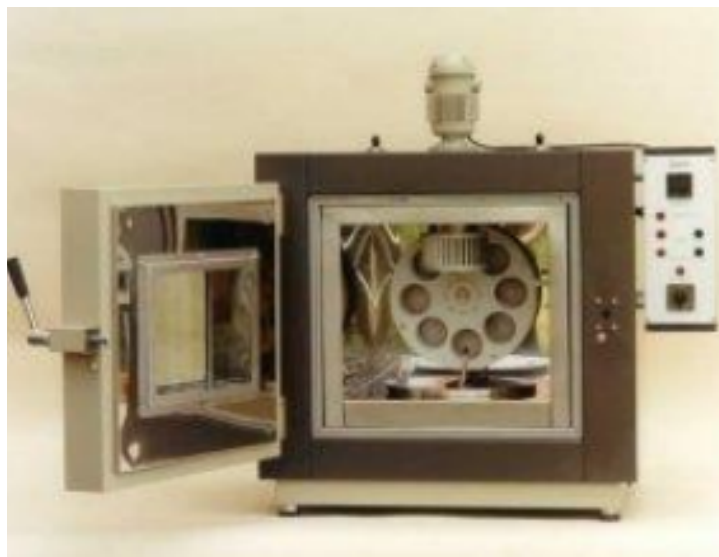
*Figura 7: Prova di duttilità*

5. Prova di viscosità dinamica: consente di determinare la consistenza del bitume a precise temperature. La prova prevede l'uso di un viscosimetro, colando del bitume in un contenitore; tramite una sonda, che si fa scendere all'interno del recipiente, si misura la resistenza alla rotazione con vari sforzi, più o meno forti. Infine quando si è stabilizzato il valore sullo strumento, si misura la viscosità alle diverse temperature;



*Figura 8: Prova di viscosità dinamica*

6. Rolling thin film oven test: lo scopo della prova è riprodurre l'invecchiamento del bitume a breve termine (che può avvenire per ossidazione o per la perdita di parti volatili durante la distillazione) andando a vedere come si comporta nel tempo. Si simula il tutto tramite un macchinario, nel quale si riscalda un sottile film di bitume in una stufa rotante a  $163^{\circ}\text{C}$  per 75 minuti; il risultato si esprime come percentuale in relazione al peso originario prima del riscaldamento; successivamente si misura la quantità di sostanze volatili che, nelle condizioni di prova, lasciano il bitume. Il confronto con i valori determinati sul campione prima del riscaldamento, rende possibile una valutazione sugli effetti subiti dal bitume durante la prova (invecchiamento). Generalmente, si riscontrano aumenti per quanto riguarda la durezza del bitume, quindi un aumento del punto di rammollimento e una diminuzione della penetrazione.



*Figura 9: Rolling thin film oven test*

## 1.4 BITUME MODIFICATO

Il bitume è una miscela d'idrocarburi ad alto peso molecolare. Si tratta di un materiale organico, di origine naturale o industriale, solubile in solfuro di carbonio.

Nella produzione dei conglomerati con bitumi normali, vi sono dei limiti nella temperatura che coincide o con il punto di rammollimento (55°C) o quando ha un comportamento vetroso, provocando fessurazioni nella pavimentazione(-8°C): il bitume modificato aumenta conseguentemente questo intervallo di temperatura. La produzione di conglomerati bituminosi con l'utilizzo di esso, è obbligata a incrementare le prestazioni dei bitumi utilizzati nelle applicazioni su strada, aeroporti e piste, migliorando l'aspettativa di vita e al contempo la riduzione dei livelli di manutenzione.

Le varianti, rispetto alla formula della miscela tradizionale standard, sono molto numerose e possono riguardare diversi aspetti: la composizione chimica dei bitumi, le temperature di miscelazione dei vari componenti, la granulometria degli aggregati, il tipo di filler, la compatibilità del bitume con il polimero (il polimero più utilizzato è SBS). L'ottimizzazione di questi parametri chimici, fisici e strutturali, porta alla realizzazione del "bitume modificato ideale".

Per questi motivi, la ricerca sui bitumi è in continua evoluzione ed oggi si può parlare di bitumi modificati (Polymer Modified Bitumens, PMB), ovvero bitumi tradizionali addizionati con polimeri. I polimeri sono macromolecole costituite da catene di monomeri ripetute per un gran numero di volte. La sequenza e la struttura chimica del monomero determinano le proprietà fisiche del polimero, e vista la grande varietà sul mercato, è possibile il miglioramento mirato di specifiche prestazioni del bitume.

Le tante tipologie di polimeri sul mercato possono essere ricondotte a due grandi famiglie:

- termoidurenti (non utilizzati in ambito stradale)
- termoplastici: (comportamento simile al bitume poiché si sciolgono e rapprendono a temperature simili)
  - fluidificano e diventano reversibilmente malleabili se riscaldati;
  - costituiti da catene macromolecolari lineari raramente anche ramificate;
  - vengono inglobati nei bitumi ad alta temperatura, con il risultato di una miscela paragonabile ad un liquido viscoso;
  - si dividono, a loro volta, in due grandi gruppi: elastomeri e plastomeri.



I polimeri termoplastici elastomerici sono i più utilizzati e migliorano prevalentemente il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici, quindi le deformazioni di traffico vengono recuperate. Le principali tipologie sono:

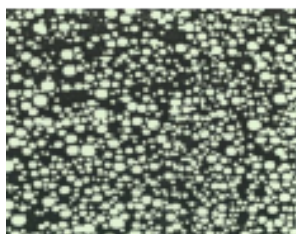
- SBS (stirene-butadiene-stirene)
- SIS (stirene-isoprene-stirene)
- SB (stirene-butadiene)
- SBR (stirene-butadiene-rubber)

Non tutti i polimeri però sono adatti per un determinato bitume e non tutti i bitumi sono adatti per un determinato polimero. Ciò fa capire come in un processo industriale si possa ottenere un bitume modificato migliore rispetto a una modifica fatta in cantiere. Questo comporta un bitume che non abbia caratteristiche volute in partenza e soprattutto che ci possa essere una separazione bitume-polimero e problemi sia in fase di stoccaggio sia nella fase di trasporto all'interno delle autobotti.

Tramite l'aggiunta di questi elementi si ha un miglioramento sotto molteplici aspetti:

- maggiore rigidità alle basse temperature
- migliorata la resistenza all'invecchiamento
- migliorata la resistenza alla fatica (deformazione per sollecitazione carichi)
- minore suscettibilità alle variazioni di temperatura
- maggiori capacità elastiche

Tutti questi potenziamenti sono conseguenti all'aggiunta di una bassissima percentuale di polimeri (2 – 10% in peso), distinguendo in base ad essa: bitume modificato soft (<4%), medium ( $\cong$ 5%), hard (>5%).



**% polimero: 3%**



**% polimero: 5%**



**% polimero: 7%**

*Figura 10: Percentuali di polimero*



Una prova che consente di controllare l'utilizzo di polimeri e nel caso del tipo, elastomerico o plastomerico, è la spettroscopia all'infrarosso. Per realizzarla serve una quantità di bitume molto piccola, basta infatti prelevare 4-5 granuli di conglomerato bituminoso ed estrarre il bitume necessario. La prova produce un grafico e in corrispondenza di particolari lunghezze d'onda, i picchi segnalano i tipi di polimeri.

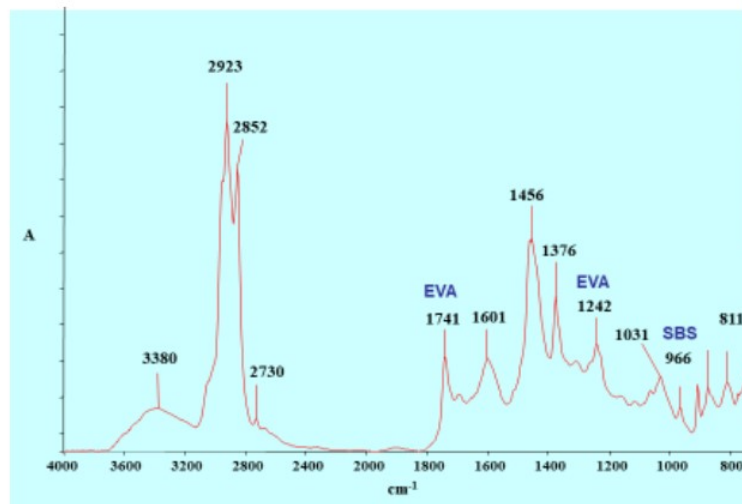


Figura 11: Grafico con differenti tipi di polimero

Oltre a determinare la presenza, si può fare anche la stima della quantità del polimero presente.

I miglioramenti sono in grado di modificare sostanzialmente il comportamento reomeccanico del bitume, incrementando notevolmente alcune importanti caratteristiche prestazionali. Difatti, è interessante sottolineare che per il PMB si parla di bitume modificato (e non additivato), in quanto, l'aggiunta del componente polimerico, influenza il comportamento reologico e la suscettività termica del bitume.

Oltre ad allungare la vita utile del manto stradale, la modifica con polimeri ha inoltre consentito la realizzazione di conglomerati bituminosi di tipo "aperto", ossia ad elevato grado di porosità (fino al 18% contro un massimo del 5% consentito da un manto tradizionale), aventi ottime proprietà drenanti e fonoassorbenti. Questo riduce la creazione di film sottili d'acqua ed evita il problema dell'aquaplaning, ovvero lo slittamento dello pneumatico nel caso di manto stradale bagnato, migliorando anche l'impatto del rumore sulle persone.

Da sempre, il bitume viene utilizzato come impermeabilizzante e, con questa aggiunta, le sue capacità idrorepellenti aumentano ulteriormente. Oltre a limitare il problema dell'aquaplaning, con una maggiore impermeabilizzazione, si evitano tutti i dissesti causati

dalla penetrazione dell'acqua sotto il manto stradale, causando un indebolimento delle proprietà meccaniche dell'infrastruttura.

Inoltre, l'aggiunta di polimeri, permette di prolungare la vita utile delle pavimentazioni di ben oltre 4 anni. Da un punto di vista economico, la produzione di polimeri modificati necessita una spesa maggiore. A parità di spessore del manto stradale, si ha un aumento dei costi intorno al 30%. In virtù dell'allungamento di vita utile fino a 8 anni, il nuovo bitume consente di risparmiare su eventuali spese di manutenzione e monitoraggio, quindi, nonostante le spese di produzione e messa in opera siano maggiori, nel tempo se ne vedranno i benefici.

Attualmente, sono in corso diverse sperimentazioni che vedono la produzione di PMB con polimeri riciclati ed in particolare con trucioli ricavati da vecchi pneumatici.

Il processo di produzione, prevede prima di tutto, di preparare le materie prime anteriormente al processo di miscelazione: il bitume deve essere riscaldato in cisterne di servizio a 170-180°C e i sacchetti di polvere di polimero, devono essere disposti intorno al sistema di dosaggio in base alla ricetta da produrre.

Il bitume deve essere pompato dal serbatoio di servizio esterno fino a T1 o T2 (cisterne di pesatura e miscelazione) grazie alla pompa di riempimento a seconda del peso necessario. Dopo che la quantità minima prestabilita è stata trasferita alle cisterne di pesatura, vengono avviati i sistemi di dosaggio dei polimeri e l'operatore inizia a caricare i sacchetti nelle apposite tramogge. Il peso del bitume è controllato dal sistema di controllo PLC secondo la quantità impostata in ricetta; se la quantità di polimero necessaria non è ancora caricata dall'operatore, il PLC arresta il funzionamento della pompa P1 e attende la conferma del corretto riempimento del polimero. Quando la quantità esatta del polimero è confermata, il PLC completa automaticamente il peso del serbatoio al totale di bitume più polimero. Per una migliore efficacia nella disintegrazione del polimero nel bitume attraverso il mulino, la miscela di polimero e bitume dovrebbe essere pompata fino al mulino senza nessuna attesa. Quando sia il bitume che i polimeri sono caricati nel serbatoio, il PLC inizierà a pompare i 2 componenti tramite P2 (Pompa di alimentazione) e mulino omogeneizzatore alle cisterne di servizio del bitume modificato. È molto importante la qualità del mulino per poter garantire la produzione di un prodotto finale con alte prestazioni: proprio per questo motivo, viene utilizzato un mulino di taglia molto elevata (160 kW) che garantisce la produzione di bitume modificato anche con un solo passaggio nel processo di modifica. Sotto il controllo del PLC, mentre la pompa P2 invia il bitume modificato alla cisterna di deposito, la pompa P1 riempie l'altro serbatoio per il ciclo di produzione successivo. Le suddette fasi di produzione vengono pertanto ripetute in modo completamente automatico fino alla fine del processo di

produzione del bitume modificato. Per quanto riguarda la fase di conservazione, il bitume modificato deve essere stoccato in cisterne apposite che permettono di realizzare l'agitazione del PMB. Per evitare l'agglomerazione del polimero, l'agitatore deve essere fatto funzionare circa 5-10 minuti ogni ora.

Per aumentare la stabilità della miscela, il contenuto della cisterna deve essere mantenuto ad una temperatura di 160-180 °C. Il bitume modificato deve essere riscaldato fino alla corretta temperatura idonea per la produzione del conglomerato bituminoso a caldo ed anche durante la produzione di conglomerato, il bitume modificato dovrebbe possibilmente essere mantenuto in agitazione tramite agitatori o almeno tramite ricircolo con la pompa di carico.

Tra i polimeri, quello che attualmente viene maggiormente utilizzato nella modifica dei leganti è il termo-polimero stirene-butadiene-stirene (SBS), aggiunto in percentuali variabili fra il 3 e l'8% in peso, a seconda della base bituminosa e delle prestazioni richieste al prodotto finale. Questo particolare copolimero SBS, si produce industrialmente attraverso la polimerizzazione anionica vivente in solventi cicloalifatici ed è una gomma artificiale appartenente a elastomeri termoplastici. Il bitume SBS o bitume di gomma, si ottiene aggiungendo gomma artificiale. A differenza di APP (una miscela ottenuta con mezzi meccanici), una miscela SBS di alta qualità è una miscela chimica di gomma e molecole di bitume.

Quando l'SBS viene a contatto ad alta temperatura con il bitume, quest'ultimo "rigonfia" il polimero e diffonde al suo interno. Inizialmente le interazioni tra bitume e SBS si manifestano coinvolgendo preferenzialmente la fase flessibile del polimero, sia perché questa ne rappresenta la matrice, sia per il suo maggior volume libero. Il processo di miscelamento coinvolge prevalentemente la fase più flessibile del polimero, con i domini stirenici solo parzialmente rigonfiati e quindi ancora segregati ed in grado di esplicare la loro funzione di nodi di un reticolo tridimensionale. In tal modo il polimero, anche se aggiunto in quantità modeste, riesce a conferire proprietà elastomeriche all'intero sistema. Pertanto, è importante che le modifiche siano prodotte in condizioni di stress termomeccanici non eccessivi, in maniera tale che la parte polimerica conservi "memoria" della sua struttura originale. Una caratteristica unica della modifica del bitume con l'aiuto di SBS è la creazione di una matrice polimerica che rappresenta una griglia tridimensionale formata dall'integrazione di blocchi di polistirene nei cosiddetti domini di polistirene. All'interno di questa maglia elastomerica, il bitume è distribuito nella forma della più piccola dispersione

Lo stoccaggio ed il successivo trasporto vengono effettuati in serbatoi riscaldati privi di agitazione. Ecco allora che in tali condizioni, i PMB sono intrinsecamente vincolati ad una situazione di rischio per quanto riguarda la stabilità della miscela, che risulta sempre essere l'aspetto critico per il loro impiego. In sintesi, se la compatibilità tra fase polimerica e fase bituminosa non è sufficiente, durante lo stoccaggio si può verificare una macroscopica separazione di fase con conseguenze negative dal punto di vista applicativo; viceversa, se le condizioni di miscelazione sono tali da causare una dissoluzione troppo spinta del polimero nella fase bituminosa, l'effetto sulle proprietà meccaniche del bitume modificato può risultare molto modesto. La vera difficoltà del processo di modifica del bitume stradale, consiste pertanto nel trovare le condizioni ottimali, in relazione alla natura chimica dei componenti impiegati, al fine di ottenere il miglior compromesso per quanto riguarda le proprietà termiche e meccaniche del bitume modificato e la sua stabilità allo stoccaggio. Il problema è stato affrontato, sia variando le apparecchiature di miscelamento o l'ordine di aggiunta dei componenti, sia mediante l'impiego di agenti compatibilizzanti o di polimeri funzionalizzati in grado di stabilire un legame chimico con alcuni componenti del bitume.

Dal punto di vista morfologico il bitume modificato con elastomeri costituisce un sistema multifase: una fase ricca in polimero contenente una certa percentuale di malteni assorbiti dallo stesso, una fase ricca di asfaltini ed una fase costitutiva principalmente da malteni. Una tecnica che consente di visualizzare facilmente il grado di miscelazione raggiunto fra bitume e polimero e stabilire se è avvenuta o meno l'inversione di fase è la microscopia in fluorescenza. A basse concentrazioni del modificante (solitamente inferiori al 4%, ma la soglia è variabile) si osserva una fase bituminosa continua nella quale è disperso il polimero: ne risulta un materiale meno fragile alle basse temperature, con caratteristiche della miscela ancora dipendenti dal legante di partenza.

Ad elevate concentrazioni di SBS (superiori al 5-7%) si forma una matrice polimerica continua nella quale il bitume funge da agente plastificante; le proprietà di questo sistema dipendono principalmente da quelle del polimero. Se il contenuto in polimero è intermedio, intorno al 4-6%, si possono formare microstrutture nelle quali le due fasi sono continue ed interconnesse; questa dispersione è difficile da controllare perché le proprietà dipendono spesso dalla storia termica. Quando l'SBS è miscelato con la base bituminosa, la fase elastomerica del copolimero assorbe la frazione maltenica (frazione oleosa) e si rigonfia, aumentando il suo volume fino a nove volte, in funzione del tipo di base. Percentuali di polimero medio-alte, intorno al 5-7% in peso, creano una rete tridimensionale polimerica

che modifica radicalmente le proprietà del bitume. Il prodotto ottenuto ha un intervallo di elastoplasticità molto più ampio, miglior comportamento ad alte e basse temperature e maggior resistenza alla fatica e all'usura dettato dall'incremento delle proprietà elastiche. Il problema derivante dalla modifica con questo copolimero è che la struttura non è termicamente stabile.

Gli asfaltini e il polimero competono per il potere solvente della fase maltenica e, se la quantità di maltene è insufficiente, si può creare una separazione di fase; questa separazione è un indice della incompatibilità della base bituminosa con la fase polimerica. L'efficacia della modifica e la stabilità durante il trasporto, lo stoccaggio e la messa in opera del prodotto, si basano sull'ottimizzazione di molti parametri:

- composizione e quantità del modificante;
- composizione del bitume;
- profilo termico del processo di miscelamento;
- entità dello sforzo di taglio nella miscelazione e adeguato tempo di contatto;

Le proprietà fisiche dei bitumi modificati elastomerici sono:

- per un bitume ideale la consistenza rimane costante all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio e decresce improvvisamente nel campo delle temperature di posa in opera
- per un bitume reale convenzionale la consistenza tende ad avere un andamento lineare al variare della temperatura, questo comporta di norma proprietà inadeguate alle temperature di servizio;
- per un bitume modificato con SBS il comportamento si approssima a quello del bitume ideale proprio all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio.

Possiamo poi analizzare la differenza tra le proprietà fisiche di un bitume naturale con uno modificato con polimeri SBS. Del bitume si sfrutta la termo-dipendenza, ovvero, la possibilità di portarlo a uno stato liquido con un riscaldamento a temperature intorno ai 150-180°C in modo da poterlo impastare con gli aggregati e poi avere un prodotto rigido alle temperature di esercizio.

In realtà, la consistenza del bitume varia all'aumentare della temperatura, quindi se riscaldo perde di consistenza, al contrario se raffreddo ho una maggiore consistenza.

□ per un bitume ideale la consistenza rimane costante all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio e decresce improvvisamente nel campo delle temperature di posa in opera;

□ per un bitume reale convenzionale la consistenza tende ad avere un andamento lineare al variare della temperatura, questo comporta di norma proprietà inadeguate alle temperature di servizio;

□ per un bitume modificato con SBS il comportamento si approssima a quello del bitume ideale proprio all'interno dell'intervallo della temperatura di esercizio.

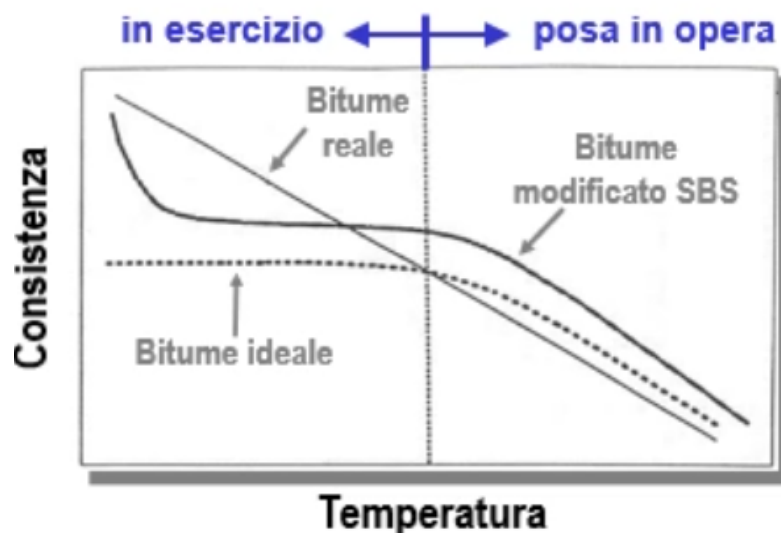


Figura 12: Consistenze del bitume al variare della temperatura

Gli effetti che il bitume comporta all'interno del conglomerato bituminoso sono:

- maggiore adesione, ovvero il contatto tra superficie di aggregato e bitume, quindi aderisce in maniera più forte alla superficie degli aggregati;
- maggiore coesione, si intende il contatto bitume-bitume cioè, in un'ipotetica sollecitazione che tende a strappare il bitume, le molecole hanno una maggiore resistenza nel caso di bitume modificato rispetto a quello normale;
- maggiore elasticità e minori deformazioni permanenti;
- maggiore flessibilità, miglioramento del comportamento a fatica dato dalle sollecitazioni cicliche;
- maggiore resistenza alle fessurazioni termiche, cioè date dalle differenze di temperature tra il giorno e la notte.

## 1.5 ASPHALT RUBBER

Nel campo dei bitumi per uso stradale, la produzione di leganti di prestazioni superiori, avviene attraverso la modifica del bitume con l'aggiunta di polimeri plastomeri, ad esempio: tipo EVA o, più diffusamente, di elastomeri SBS o SBR. Uno degli ambiti di ricerca dal forte potenziale di sviluppo, è l'utilizzo della gomma da Pneumatici Fuori Uso (PFU) come additivo nei conglomerati bituminosi per realizzare "miscele modificate" dalle prestazioni elevate. Ogni anno, infatti, oltre 350.000 tonnellate di pneumatici arrivano a fine vita in Italia a seguito della sostituzione su autoveicoli, motocicli, autocarri, mezzi agricoli ed industriali di pneumatici non più adatti alla circolazione. Recuperato in modo corretto, questo materiale potrebbe essere utilizzato come componente aggiuntivo nei conglomerati bituminosi per asfaltare ben 8.330 km di strade da 7,5 m di larghezza, pari a 7 volte e mezzo la distanza tra Milano e Palermo, più del doppio dell'intera rete di strade statali italiane.



*Figura 13: Polverino di gomma riciclato*

I conglomerati bituminosi così realizzati, sono caratterizzati da una serie di vantaggi rispetto le comuni pavimentazioni come, ad esempio: una maggiore sicurezza, minori costi di smaltimento, minor costi di manutenzione, minore inquinamento acustico e il tutto andando a vantaggio dell'ambiente, dell'economia e dell'intera collettività. Il bitume modificato con polverino di gomma di pneumatico riciclata, noto come Asphalt Rubber, viene utilizzato quale valida alternativa per il confezionamento di conglomerati bituminosi di ottima durabilità e resistenti a severe condizioni di carico.

Data la naturale capacità di assorbimento agli urti e la loro minore rigidità rispetto ai materiali comunemente utilizzati per le protezioni stradali, i granuli derivati dal recupero dei PFU sono particolarmente adatti a ridurre le conseguenze di urti e impatti di ogni tipo. L'uso dell'Asphalt Rubber costituisce una concreta applicazione per il riutilizzo dei pneumatici usati ma risulta di estremo interesse anche come soluzione strettamente tecnica consentendo di registrare significative attenuazioni del rumore da rotolamento del traffico veicolare, con una riduzione fino a 5-8 dB del livello sonoro in ambiti urbani di circolazione: un valore che corrisponde al dimezzamento dell'energia sonora percepita dall'orecchio umano. Un aspetto non secondario, dato che 1/5 della popolazione UE è esposta a livelli di rumore eccessivo, con possibili gravi danni per la salute.

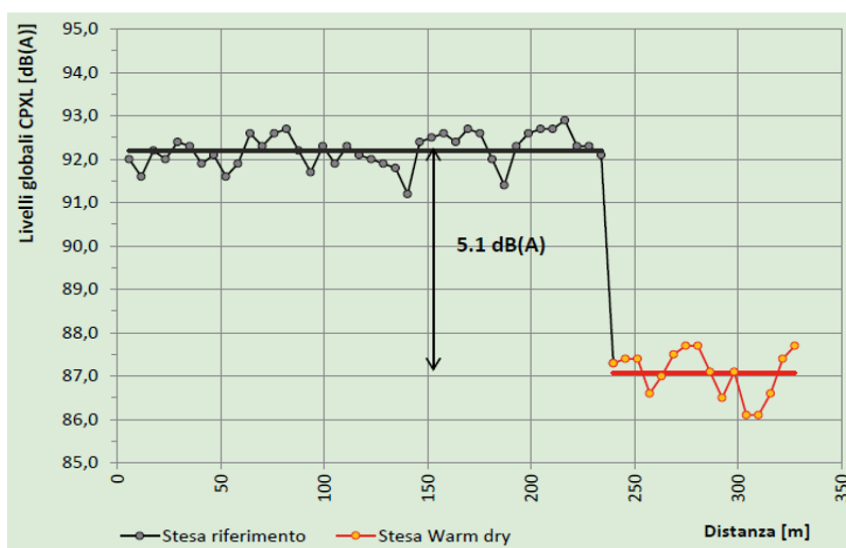


Figura 14: Riduzione dB

Il polverino di gomma è ottenuto da semplici trattamenti meccanici che non alterano le proprietà chimiche del materiale; la composizione del polverino è identica a quella degli pneumatici di origine e contiene le medesime sostanze presenti nella gomma degli pneumatici nuovi. È quindi ragionevole domandarsi se, le sostanze potenzialmente pericolose presenti negli pneumatici, possano essere rilasciate nell'ambiente attraverso l'impiego del polverino da essi ottenuto.

Una prima considerazione riguarda quindi la mobilità delle sostanze indesiderate nei due scenari di utilizzo: l'uso normale degli pneumatici e l'impiego di polverino nelle miscele bituminose. L'attrito con le pavimentazioni stradali provoca l'abrasione del battistrada degli pneumatici che, giunti a fine vita, risultano più leggeri del 10% circa. La gomma mancante è stata ridotta in polveri fini (< 30 micron) che, insieme ai gas di scarico e all'usura dei freni, concorrono alla produzione del particolato inalabile generato dal traffico veicolare.



Le dimensioni del particolato sono fino a 1.500 volte inferiori a quelle del polverino di gomma (non inalabile) utilizzato per la modifica di conglomerati bituminosi.

Oltre al fattore dimensionale, il polverino di gomma che viene inglobato nella matrice bituminosa, non risulta disperdibile nell'ambiente. Da questa considerazione discende che, i due scenari di esposizione per la salute umana e per l'ambiente sono necessariamente diversi, in quanto l'esposizione al polverino riciclato utilizzato nelle pavimentazioni stradali è prevalentemente limitata all'esposizione dei lavoratori nel corso della posa in opera del conglomerato, mentre il rilascio di particolato derivante dall'erosione degli pneumatici è di interesse per l'ambiente e la popolazione generale.

Non subito evidente, ma analiticamente calcolabile, è anche la riduzione di emissione di CO<sub>2</sub>, dovuta ad un utilizzo del PFU, rispetto al semplice riutilizzo dello stesso come combustibile per la produzione di energia, grazie alle: minori temperature operative, di miscelazione e compattazione. Queste, possono diminuire di diverse decine di gradi rispetto alle miscele tradizionali, concretizzandosi direttamente in un ridotto impatto ambientale. Inoltre, la lavorazione a temperatura ridotta permette il raggiungimento più rapido delle temperature di apertura al traffico dello strato appena steso, con vantaggi sul piano delle tempistiche di cantiere. Di difficile quantificazione ma altresì molto evidenti, sono i vantaggi relativi al minor impatto del traffico veicolare legato alle operazioni di asfaltatura sulla normale viabilità. Asphalt Rubber Italia Srl ha messo a punto uno specifico software per quantificare in modo analitico le emissioni e i consumi energetici legati al confezionamento e alla stesa delle differenti metodologie di conglomerato, così da asseverare i vantaggi ambientali della soluzione adottata.

Inoltre, recenti studi, hanno altresì evidenziato che, anche il fine vita di queste pavimentazioni consente un riciclo delle stesse più virtuoso rispetto ad altre pavimentazioni stradali. Hanno evidenziato inoltre, che l'impiego del polverino per il confezionamento di strati di usura, consente di garantire alla miscela una maggiore resistenza all'invecchiamento, all'ormaiamento, alla fessurazione e una maggiore aderenza dello strato di usura, che comporta una riduzione dei costi di manutenzione nel corso degli anni. Ricerche relative al costo e beneficio nell'uso del bitume modificato con polverino, concordano che in un'analisi del ciclo di vita di questo materiale, i benefici superano i costi iniziali, in genere più elevato rispetto alle attuali tradizionali applicazioni.

Il risparmio è comunque funzione del mercato locale, dello stato della tecnologia disponibile e delle soluzioni strutturali adottate.

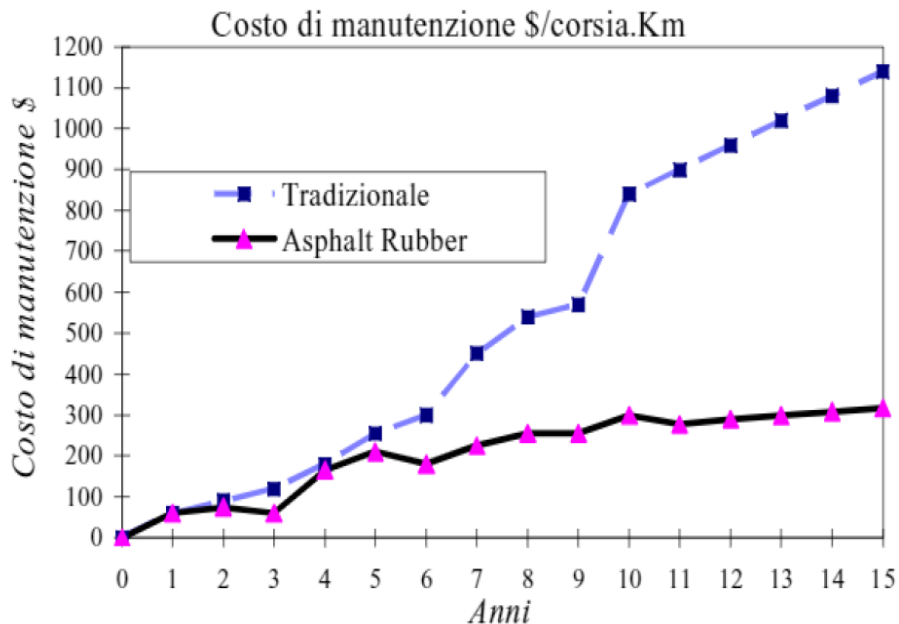


Figura 15: Relazione dei costi di manutenzione negli anni

I conglomerati bituminosi asphalt rubber si caratterizzano storicamente per le seguenti caratteristiche:

- pavimentazione stradale confezionata con conglomerati bituminosi ad alto modulo complesso che consentono di avere minori deformazioni indotte all'interno della pavimentazione stradale;
- maggiore resistenza a fatica della pavimentazione in virtù delle proprietà elastiche del legante utilizzato;
- maggiore resistenza all'invecchiamento della pavimentazione: la modifica del bitume con il polverino di gomma interessa la frazione maltenica del legante che costituisce la frazione più volatile del bitume stesso creando un gel all'interno della matrice del bitume che ne impedisce l'ossidazione, mantenendone più a lungo le caratteristiche elastiche;

Tali caratteristiche, sono state verificate con un monitoraggio decennale di oltre 100 campi prova, per comparare le prestazioni dei conglomerati bituminosi tradizionali, con i conglomerati bituminosi Asphalt Rubber. In Italia sono stati realizzati diversi progetti con riduzioni significative dello spessore delle pavimentazioni stradali.

In termini ambientali, i vantaggi ottenuti con questa riduzione dello spessore sono evidenti:

- minor consumo di materie prime (inerti di cava e bitume);
- minori emissioni legate al trasporto delle materie prime all'impianto;
- minori emissioni legate al trasporto di una minor quantità di conglomerato bituminoso al cantiere di stesa;
- minori emissioni e consumi energetici per la stesa di una minor quantità di conglomerato bituminoso.

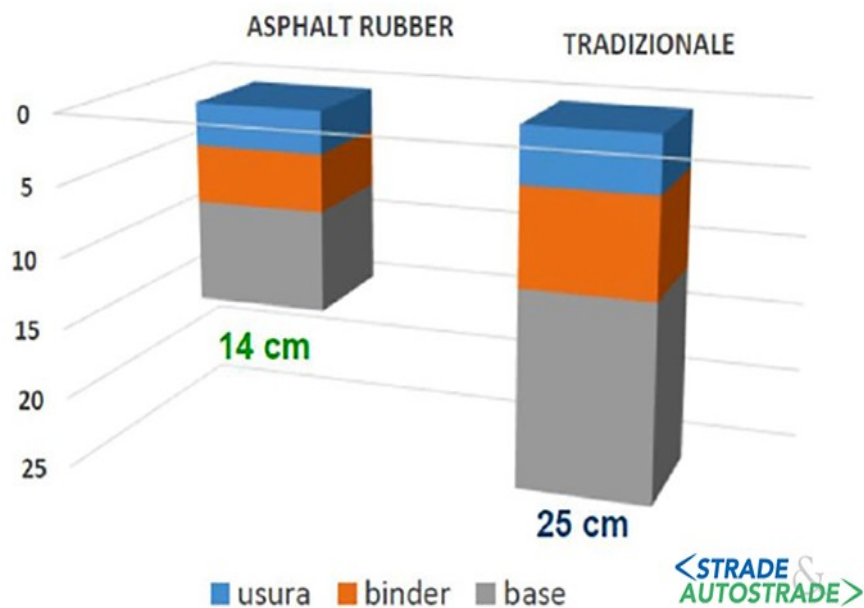


Figura 16: Riduzione spessore delle pavimentazioni stradali

L'interazione ad alta temperatura del bitume con le particelle di gomma provenienti da pneumatici viene descritta in diversi modi. Viene presentata talvolta come una reazione chimica di degradazione degli elastomeri per effetto termico, oppure come un processo di devulcanizzazione della gomma in cui vengono rotti i legami zolfo-zolfo propri della vulcanizzazione. Tuttavia, l'interazione tra bitume e gomma, è principalmente un fenomeno fisico, il cui meccanismo principale consiste nel rigonfiamento della gomma dovuto all'assorbimento delle frazioni più leggere del bitume. Nel processo di digestione della gomma nei bitumi, le particelle di gomma iniziano a gonfiarsi e ad aumentare di volume come conseguenza dell'assorbimento delle frazioni aromatiche.

La superficie esterna delle particelle di gomma diventa gelatinosa e tende a disfarsi per effetto dell'agitazione mentre viene incorporata nel bitume. Portando il fenomeno al limite, se temperatura, energia o tempistiche di agitazione venissero protratti, la particella di gomma scomparirebbe all'interno del bitume. Infatti, la normativa stabilisce che, tutti i tipi di

leganti gommati, indipendentemente dalla categoria e dal processo di fabbricazione, debbano essere stoccati in un serbatoio per almeno 8 ore e per un massimo di 72, prima di essere utilizzati nella produzione di miscele bituminose. Il serbatoio deve essere preferibilmente verticale e dotato di sistema di riscaldamento, agitazione e ricircolo, oltre a disporre di punti di prelievo-campioni a diverse altezze. Di fatto, va sottolineato che i tempi di stoccaggio superiori alle 72 ore possono influire negativamente sulle proprietà del prodotto. Sulla base dell'esperienza industriale spagnola degli ultimi anni, tempi d'interazione (produzione + stoccaggio) pari ad 1 ora sono sufficienti a garantire il corretto grado di digestione della gomma ed il soddisfacimento delle specifiche richieste al legante, anche nel caso di bitumi modificati con gomma ad alta viscosità. L'interazione della gomma con il bitume prende il nome di: digestione. L'opportuna combinazione di temperatura e tempo di contatto, garantisce il corretto grado di integrazione della gomma nel bitume con un miglioramento complessivo delle proprietà del legante. L'eccessivo protrarsi del processo, comporta la diluizione della gomma nel bitume con una conseguente riduzione del miglioramento ottenuto precedentemente. Esistono vari aspetti che hanno contribuito a migliorare la conoscenza dell'interazione bitume-gomma, favorendo quindi, il processo di digestione:

- l'aumento della temperatura;
- il prolungamento del tempo di contatto;
- la riduzione della dimensione delle particelle di gomma;
- l'aumento del contenuto di frazioni leggere nel bitume;
- l'aumento dell'energia di miscelazione;

I conglomerati bituminosi con polverino di gomma, fanno parte delle miscele di "nuova generazione", impiegate per la realizzazione di strati di base, collegamento anche ad alto modulo e manti di usura speciali ad elevata resistenza meccanica. Sono miscele che, in funzione delle caratteristiche granulometriche e alla gomma riciclata, consentono di ottimizzare le prestazioni della pavimentazione, garantendo: maggiore durabilità, stabilità e sicurezza della circolazione. A seconda della metodologia di modifica del bitume o additivazione con polverino all'interno del conglomerato bituminoso "wet" o "dry" e delle tecnologie di produzione "a caldo" (hot) e "a tiepido" (warm) è possibile ottenere miscele a bassa emissione sonora, adattabili alle diverse esigenze del cantiere.

Per prima cosa lo pneumatico deve essere demolito togliendo la tela interna, fili di acciaio di rinforzo e dopodiché la gomma potrà essere finemente tritурata. Nel processo wet, il

polverino di gomma viene miscelato con il bitume ad una  $T > 177^{\circ}\text{C}$  stabilita dalla normativa ASTM, si avrà un tempo di reazione 45-60 minuti con un dosaggio di polverino di circa 18-22% sul peso del legante (dosaggio maggiore rispetto al polimero SBS).

Durante la miscelazione il polverino non si scioglie completamente, quindi non si ha un nuovo prodotto trasformato in maniera chimica. Questo consente di avere delle caratteristiche simili al SBS. Per miscelare il polverino, serve un apposito impianto dotato di un mulino e un serbatoio riscaldato con serpentine a olio diatermico. Una volta miscelato si trasporta il tutto in autobotte, viene portato ad un impianto di produzione del conglomerato bituminoso e il processo sarà identico alla procedura di confezionamento delle miscele normali.



Figura 17: Processo di produzione bitume modificato

Tramite i bitumi modificati con il polverino si possono realizzare: conglomerati bituminosi chiusi o conglomerati bituminosi aperti. Nel primo caso il tipo di assortimento è finalizzato a incrementare in maniera considerevole il contatto granulo-granulo in associazione alla presenza di legante modificato con gomma. La composizione finale della miscela (da valutarsi mediante una procedura di mix design) prevede normalmente un elevato contenuto di bitume (dal 7 al 9%) mentre le caratteristiche finali sono quelle di un conglomerato semi-chiuso (5-8% di vuoti). Le elevate prestazioni meccaniche sono connesse alla presenza della fase gommosa che conferisce al legante originario un incremento della elasticità, una diminuzione della suscettibilità alla temperatura e un notevole miglioramento della resistenza alla rottura per fatica e all'ormaiamento; essi sono pertanto utilizzati con funzione strutturale. Le miscele di tipo aperto trovano invece impiego nella realizzazione di manti di

usura. Presentano un assortimento degli aggregati, costituito in genere dalla combinazione di due o tre frazioni granulometriche con ridotta presenza di filler, il che permette di garantire elevate caratteristiche di rugosità superficiale, capacità drenante e di assorbimento acustico (in aggiunta al contributo derivante dalla presenza del polverino). I miglioramenti dati dal metodo wet sono:

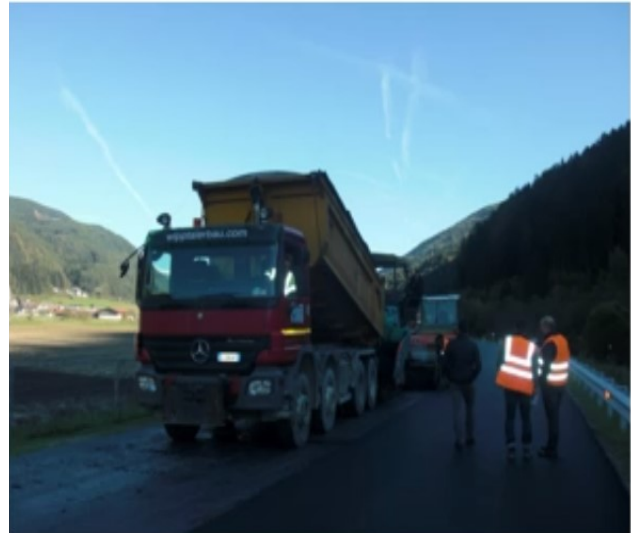
- riduzione della propagazione di fessure di riflessione;
- migliore comportamento a fatica;
- buone prestazioni ad alte e basse temperature;
- rende il legante elastico e con una maggiore duttilità;
- garantisce aderenza e sicurezza.

Alla tecnologia propria dell'asphalt rubber che, come innanzi specificato, richiede un processo del tipo wet, si affianca anche una tecnica detta dry, nella quale il polverino viene aggiunto a freddo alla miscela calda unitamente alle altre componenti direttamente all'atto della produzione. In questo caso non si produce una modifica chimica del legante ma i granuli di gomma (opportunamente qualificati dal punto di vista dimensionale) sostituiscono in parte alcune frazioni granulometriche nella curva di distribuzione degli aggregati. I dosaggi del polverino sono rilevanti con percentuali tra lo 0,5% e il 3% e con indicazioni anche sulla granulometria, dato lo sconsigliato uso di dimensioni superiori a 2 mm e particolare attenzione alla frazione 0,6-2 mm, data la possibilità di fenomeni di segregazioni; si possono creare inoltre, situazioni in cui l'assorbimento da parte del polverino delle frazioni aromatiche del bitume può portare a fenomeni di sgranamento superficiale.

Si può analizzare poi la differenza di qualità dell'aria tra i due metodi per ciò che concerne la sicurezza dei lavoratori. Le valutazioni di rischio effettuate sulle basi di tali dati evidenziano che, se la temperatura di posa in opera non supera i 160°C, il rischio incrementale associato agli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) per gli operatori più prossimi alla tramoggia e al banco della finitrice (ovvero quelli maggiormente esposti) è considerato rischioso data la formazione di fumo che costituisce anche inquinamento atmosferico [figura 19]. Tale rischio non si differenzia da quello associato alla posa in opera di manti convenzionali. Così come per la posa in opera di conglomerati bituminosi convenzionali, tale rischio può quindi essere ulteriormente ridotto, al di sotto di valori ritenuti accettabili per la popolazione generale, tramite l'utilizzo del metodo dry che consente temperature minori sia di stesa che di miscelazione e consente di non avere fumi [figura 20].



*Figura 18: metodo wet*



*Figura 19: metodo dry*

Diversi studi hanno messo in evidenza che i leganti modificati con gomma, manifestano prestazioni superiori ai leganti tradizionali e che a volte anche a quelli modificati con altri additivi. Con il processo Wet, infatti, si ottiene un legante di caratteristiche migliorate rispetto al bitume originario grazie:

- alla maggiore densità,
- del maggior punto di rammollimento,
- della minore suscettibilità termica,
- della maggior resistenza allo scorrimento,
- del minore invecchiamento,
- della minore suscettività termica,
- della maggior resistenza allo scorrimento,
- della minor tendenza alla fessurazione nei climi freddi,
- dell'ottima impermeabilità all'acqua e all'adesione dell'aggregato.

Questa tesi si incentra sullo studio del conglomerato bituminoso tipo binder (o collegamento) con l'utilizzo di bitume modificato. È un conglomerato bituminoso ad elevata resistenza meccanica di tipo semichiuso, avente funzione di strato di ancoraggio per lo strato superficiale di usura. Dal punto di vista strutturale si trasferiscono, senza deformazioni

permanenti, carichi superficiali allo strato di base o direttamente agli strati di fondazione, qualora la struttura non preveda lo strato di base.

Il conglomerato bituminoso è costituito da una miscela di pietrischi, graniglie, sabbie di frantumazione e additivo minerale (filler) impastati a caldo, in impianto, con bitume modificato. L'impiego di queste soluzioni è relativo a:

1. strati di collegamento delle pavimentazioni multistrato in conglomerato bituminoso, flessibili o semirigide, di cui si vogliono incrementare le resistenze meccaniche rispetto al binder tradizionale;
2. piazzali a elevata intensità di carico;
3. strati di binder che in opera possono essere soggetti a temperature elevate o essere interessati a deformazioni visco-plastiche;
4. autostrade, strade extraurbane e urbane ad alta intensità di traffico;

Le pavimentazioni eseguite con bitume modificato con polverino di gomma riciclato riutilizzano migliaia di pneumatici fuori uso, altrimenti destinati alla combustione o alla discarica. Nota la pericolosità dei fumi risultanti dai processi di combustione dei pneumatici fuori uso, può erroneamente ritenersi che il processo di riciclaggio nel conglomerato bituminoso possa rappresentare un pericolo di altrettanta gravità. In realtà non è così, dal momento che il processo di produzione del bitume modificato con polverino, non produce fumo, in quanto non vengono raggiunte le temperature di combustione della gomma, ma solo quelle di fusione. Inoltre, le particelle di gomma prodotte non sono sufficientemente piccole da rendersi volatili. Studi relativi al costo e beneficio nell'uso del bitume modificato con polverino, concordano che in un'analisi del ciclo di vita di questo materiale, i benefici superano i costi iniziali, in genere più elevato rispetto alle attuali tradizionali applicazioni.

Le esperienze d'insieme degli studi finora condotti, sia sul panorama internazionale che su quello nazionale, si mostrano positive e muovono verso nuovi scenari applicativi. Molti risultati dei test e delle indagini condotti in diversi ambiti concordano sugli esiti raggiunti e condividono le medesime considerazioni riguardanti aspetti tecnici e prestazioni ambientali. Nell'ambito della cultura complessiva del riciclo, il reimpiego dei Pneumatici Fuori Uso rappresenta oggi una grande opportunità di miglioramento delle prestazioni ambientali delle infrastrutture stradali, con importanti conseguenze positive sull'ambiente dell'avere un'alternativa convenzionale per la riabilitazione stradale e le nuove costruzioni e non si tratta soltanto di integrare un materiale riciclato nelle costruzioni stradali, bensì di migliorare sostanzialmente le prestazioni di un bitume con l'aggiunta della gomma, anche nei confronti di altri tipi di soluzioni tradizionali.



## 1.6 IMPIANTI

Gran parte delle miscele comunemente impiegate nella costruzione della sovrastruttura stradale, viene prodotta in opportuni impianti le cui caratteristiche dipendono: dal tipo di miscela, dalla casa costruttrice dell'impianto e da eventuali peculiarità tecniche legate alle specifiche esigenze dell'impresa. Indipendentemente dal materiale prodotto, gli impianti si possono distinguere in fissi o mobili. I primi, sono collocati lontano dai centri abitati in modo permanente, ma non ad un specifico cantiere. Possono però operare a servizio di una intera zona, che ha estensione e limiti dipendenti essenzialmente dal tempo necessario per il trasporto, dal sito di produzione a quello di posa.



*Figura 20: Schema di un impianto fisso*

Il tempo di trasporto dipende da vari fattori: tra cui il contesto territoriale (urbano, sub-urbano o extra-urbano), le caratteristiche della rete stradale (morfologia, stato manutentivo) e i livelli medi di traffico; tutto ciò incide notevolmente sulla produttività del cantiere e dunque sui costi, ma vi sono da considerare anche aspetti tecnici. Nel caso dei conglomerati bituminosi, per esempio, un elevato intervallo di tempo tra la produzione e la stesa può provocare un eccessivo raffreddamento del materiale determinando condizioni di temperatura non idonee alla messa in opera. Va inoltre considerato che, l'installazione di un impianto fisso, deve essere compatibile con gli strumenti urbanistici, di pianificazione territoriale e di salvaguardia ambientale. Necessita pertanto del rilascio di tutte le relative autorizzazioni da parte degli Organismi competenti.

Gli impianti mobili, per ciò che attiene ai principi di funzionamento, non differiscono in modo sostanziale da quelli fissi. Vengono allestiti in prossimità o all'interno dell'area di cantiere, riducendo così in modo significativo le distanze e i tempi di trasporto con conseguenti

vantaggi sia di natura tecnica, sia di natura economica. Essendo per loro natura temporanei e a servizio esclusivo di un determinato cantiere, si ricorre a essi nel caso di lavori di notevole importo.

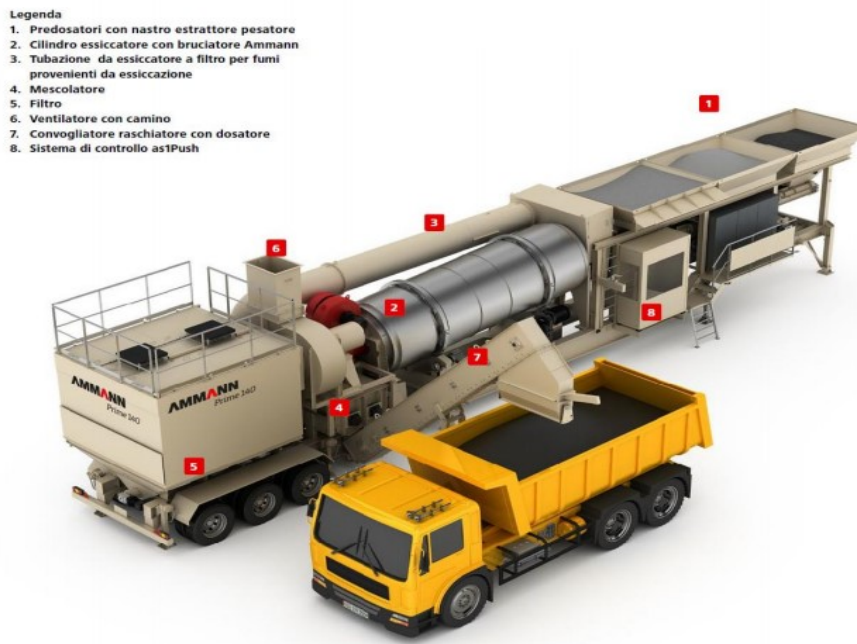


Figura 21: Impianto mobile

Un altro fattore che differenzia le tipologie di impianto è: la diversità tra le macchine utilizzate per il mescolamento a caldo del bitume con gli inerti. Tali macchinari possono essere suddivisi in due grandi categorie a seconda che la produzione sia realizzata con mescolamento **discontinuo** oppure **continuo**. Nel primo caso gli inerti, dopo essere stati essiccati, vagliati e pesati, vengono mescolati tra loro e col bitume fino ad ottenere un impasto omogeneo; il conglomerato ottenuto viene poi scaricato dal mescolatore. Nel secondo caso gli aggregati, dopo i preliminari trattamenti, vengono prelevati direttamente dai silos mediante saracinesche e alimentatori a nastro ed immessi, insieme al bitume, in un mescolatore ad azione continua. La potenzialità produttiva dell'impianto è un altro aspetto molto importante dato che può variare da poche tonnellate/ora ad oltre 200 tonnellate.

Gli impianti per la produzione dei conglomerati bituminosi a caldo, sia fissi che mobili, si distinguono in continui e discontinui. I primi necessitano di ridotta manutenzione rispetto ai secondi ma rimangono meno diffusi perché devono essere utilizzati per produzioni continuative e uniformi, senza interruzioni e senza variazioni frequenti del tipo di miscela. Per contro, la maggior parte degli impianti fissi opera invece al servizio di più cantieri, a volte anche di piccole dimensioni, dovendo far fronte a richieste di miscele con differenti

composizioni anche nell'arco della stessa giornata, poiché risultano più versatili e garantiscono maggior controllo della produzione.

L'impianto discontinuo produce singoli impasti miscelati per 40-50 secondi. Questo tipo è il più diffuso e il più facile da controllare, permettendo inoltre la massima flessibilità di utilizzo, grande versatilità e controllo sulle emissioni dei fumi per merito della presenza del filtro. Sono contraddistinti dalla presenza, a valle del tamburo di riscaldamento ed essiccazione, di una torre di miscelazione dove il conglomerato bituminoso viene prodotto in modo ciclico, anziché continuativo, in quantità predefinita per ogni ciclo.

Gli aggregati vengono prelevati dai cumuli posti a margine del cantiere e caricati grazie all'impiego di una pala meccanica; dopodiché il processo produttivo, può concettualmente distinguersi in due fasi.



*Figura 22: Tramogge per la separazione degli aggregati*

La prima di esse si svolge all'interno del tamburo. Gli aggregati prelevati dalle tramogge di alimentazione, ciascuna corrispondente a una frazione granulometrica, vengono immessi in proporzioni coerenti con la distribuzione granulometrica della miscela obiettivo (predosaggio) e successivamente riscaldati ed essiccati in modalità a flussi opposti. Per produrre il conglomerato è indispensabile essiccare le sabbie e i pietrischi (aggregati lapidei) che costituiscono il 95% della miscela bituminosa e successivamente miscelarli con il bitume.

L'essiccazione è indispensabile perché gli aggregati sono sempre molto umidi e il bitume è un materiale "idrofobo" (rifiuta l'acqua) e non aderirebbe. Mediamente il pietrisco e soprattutto le sabbie contengono il 5-7% di umidità; questo significa che per ogni tonnellata di aggregati introdotti nell'essiccatore, si devono eliminare da 50 a 70 litri di acqua. Quindi una volta dosati gli aggregati, grazie a un nastro trasportatore, avviene l'essiccazione degli aggregati all'interno di un forno che ha la forma di un cilindro rotante.



Figura 23: Tamburo essiccatore parte esterna



Figura 24: Tamburo essiccatore parte interna

Il materiale introdotto, avanza lentamente dentro un tamburo essiccatore che, con un'apposita palettatura, solleva e fa ricadere dall'alto verso il basso il materiale andando a produrre più o meno filler sulla base degli aggregati più o meno resistenti venendo scaricato e trasportato dal sollevatore a tazze.

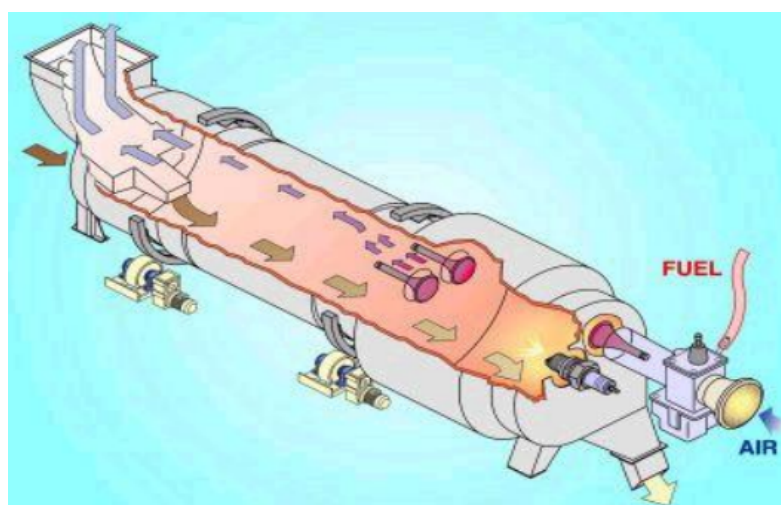


Figura 25: Fiamma controcorrente agli aggregati all'interno del tamburo essiccatore



Dentro questo cilindro, c'è un bruciatore che alimenta aria calda e il calore viene passato per irraggiamento termico agli inerti perdendo progressivamente umidità; in uscita, a una temperatura di circa 160-170 °C, è perfettamente asciutto. Durante l'essiccazione, l'aria all'interno del tamburo, densa di vapori d'acqua, di polveri prodotte dal rotolamento dei pietrischi e dei gas della combustione, viene aspirata da una ventola e filtrata attraverso un apposito depuratore (filtro a maniche) prima dell'espulsione attraverso il camino. Negli impianti discontinui, la fiamma opera in controcorrente agli aggregati (linea marrone in figura) che si avvicinano ad essa e consente un progressivo riscaldamento degli aggregati e allo stesso tempo un'ottimizzazione della quantità di energia necessaria per riscaldare gli aggregati.

Norme severissime regolamentano le emissioni. Nella posizione della fiamma, c'è anche un ventilatore che spinge l'aria calda verso la parte opposta del cilindro, facendo raccogliere le polveri delle particelle di acqua e i residui della combustione (frecce grigie in figura) nel filtro per essere abbattuti. Tutto ciò viene realizzato in modo da non inquinare l'aria facendo uscire solo vapore acqueo. Gli inquinanti considerati sono quelli tipicamente monitorati per le attività industriali, ovvero polveri sottili che si distinguono in: particelle inferiori a 10 µm, e particelle con diametro inferiore a 2,5 µm. Tale distinzione, riflette la differente capacità del particolato, di raggiungere le diverse parti dell'apparato respiratorio in funzione delle sue dimensioni: le particelle di diametro compreso tra 10 µm e 2,5 µm sono in grado di penetrare nell'apparato respiratorio dalle cavità nasali fino ai bronchioli, mentre quelle di diametro inferiore a 2,5 µm possono penetrare più profondamente nei polmoni fino agli alveoli. Data questa problematica, i controlli sono serrati e i limiti sempre più restrittivi; ciò comporta un ammodernamento di essi in modo da far uscire solo vapore acqueo. Quello che fuoriesce dagli impianti (gas di scarico), viene convogliato verso un sistema di filtri per le polveri, le quali vengono raccolte tramite una coclea e stoccate in un apposito silo, per poi essere impiegate come filler al momento della miscelazione. Una volta che il filtro si intasa, viene sottoposto a dei colpi, dato da impulsi, in modo da far cadere il trattenuto fino.

Nella seconda fase, gli aggregati provenienti dal cilindro, vengono trasportati per mezzo di un elevatore a tazze nella parte alta della torre di miscelazione ove trovano alloggio l'unità di selezione dotata di vagli vibranti, i contenitori di stoccaggio, il sistema di pesatura e il mescolatore.



Figura 26: Torre di miscelazione

Nella parte alta sono presenti i vagli vibranti, disposti in ordine di dimensione decrescente, provvedendo alla cosiddetta riclassificazione degli aggregati, separando le frazioni progressivamente trattenute per convogliarle nei rispettivi contenitori, consentendo di eliminare il materiale troppo grande. Alla parte più fine passante all'ultimo vaglio, utilizzata in quantità elevata nella maggior parte delle miscele, è generalmente dedicato un contenitore più grande. È opportuno che l'area dei vagli sia adeguata al quantitativo di materiale che arriva dall'essiccatore e alla capacità del mescolatore, infatti, in caso di intasamento di un determinato vaglio, dovuto a eccesso di materiale, gli aggregati fini tendono a “galleggiare” al di sopra di quelli di maggiore dimensione, ricadendo nel contenitore corrispondente alla classe più grossa anziché attraversare le maglie del vaglio stesso. Tale circostanza porta, di norma, a una miscela finale più ricca di frazione fina, caratterizzata da un minore grado di ricoprimento delle particelle da parte del legante, che determina consistenti errori di produzione rispetto ai requisiti richiesti. Negli impianti grandi, i contenitori a caldo (sili a caldo), possono contenere varie tipologie di aggregati che si utilizzano per realizzare la base, il binder o il tappeto in modo da poter fare delle variazioni tra un impasto e un altro. Gli aggregati vengono estratti per peso, inerti essiccati in modo da non dare importanza all'acqua che può spostare il proporzionamento ed evitare quindi uno scorretto dosaggio.

Il tutto finisce nella camera di miscelazione, chiusa, dove oltre alla presenza degli aggregati, viene pompato il bitume, eventuali additivi e infine il filler poiché tende a assorbire la maggior

parte della quantità di bitume; se fosse immesso prima, potrebbe raccogliere il bitume e non favorire la dispersione sulla superficie degli aggregati. La camera è costituita da bracci, che sono a loro volta muniti di palette in corrispondenza delle estremità.

Infine, una volta inserito tutto, parte la miscelazione ad una temperatura di circa 150-160°C, calibrando il tempo in modo da ottenere un rivestimento uniforme di tutti gli aggregati da parte del legante, senza provocarne nel contempo un eccessivo invecchiamento.

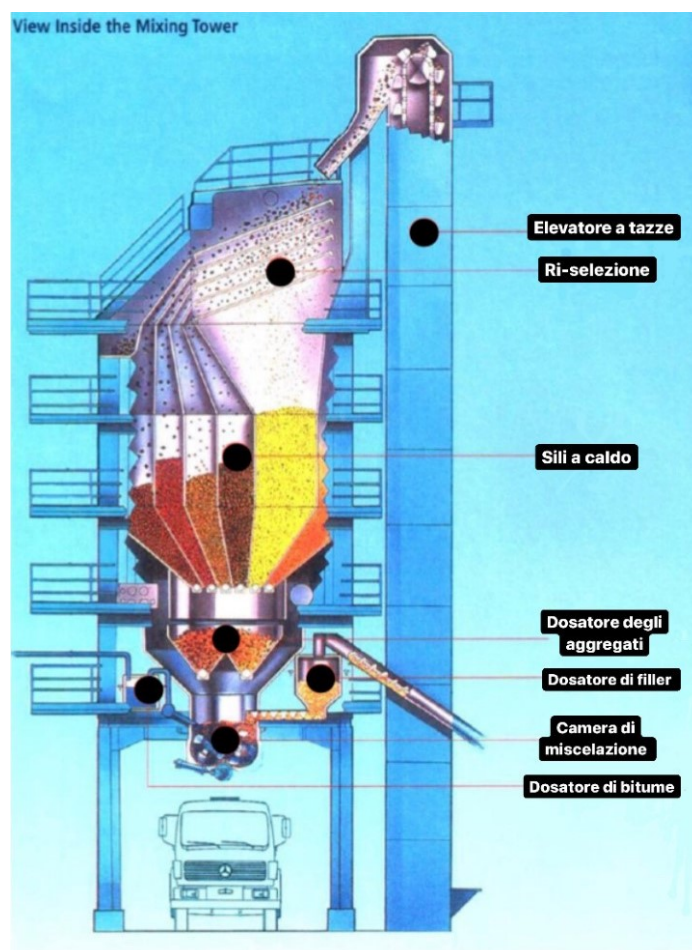


Figura 27: Diverse fasi nella torre di miscelazione

Al termine della miscelazione prende vita il “conglomerato”, si apre la parte di sotto della camera e si scarica il prodotto sul mezzo di trasporto, in modo da iniziare un nuovo processo di miscelazione per un altro dosaggio. Il ciclo di miscelazione dura circa 30 secondi ma possono essere modificati sulla base della presenza di additivi e di tipi di impasti dalla cabina di comando. Dopo di che, il conglomerato è pronto per la consegna e viene stoccato in un silo in attesa del trasporto verso il cantiere di stesa.



Figura 28: Stoccaggio bitume tramite autobotti

Il bitume invece, viene prodotto in raffineria e trasportato all'impianto tramite autobotti; viaggia allo stato fluido e ad una temperatura di circa 140-160 °C. Una volta giunto nello stabilimento, il prodotto viene scaricato nelle apposite cisterne e prelevato solo al momento dell'impiego tramite pompe e tubazioni. Per mantenere il bitume allo stato fluido, le cisterne sono coibentate e dotate di dispositivi di riscaldamento (serpentine in cui scorre olio diatermico oppure resistenze alimentate elettricamente).

Gli impianti di tipo continuo sono così chiamati perché la produzione ha un flusso continuo. Si possono distinguere in due tipologie: quelli comunemente noti come drum mixer (tradizionale), caratterizzati da un processo produttivo che si svolge in un'unica unità operativa e quelli caratterizzati dalla presenza di un sistema di miscelazione esterno, posto a valle del cilindro essiccatore che serve a riscaldare i materiali.

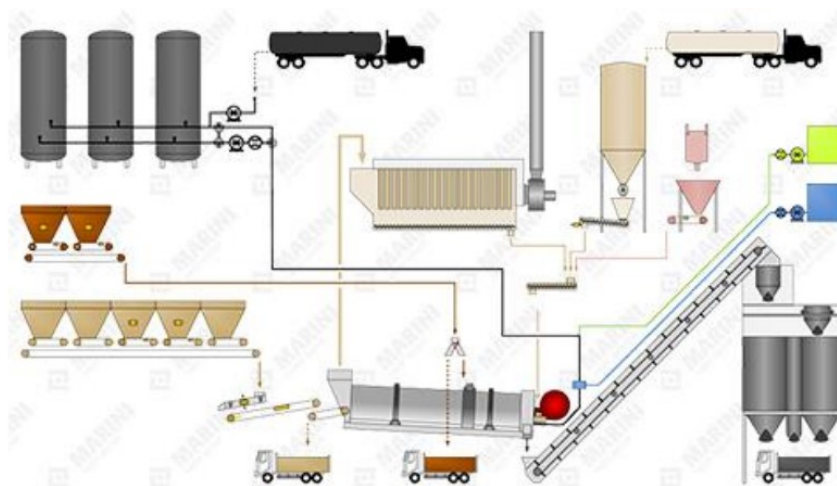


Figura 29: Schema impianto continuo



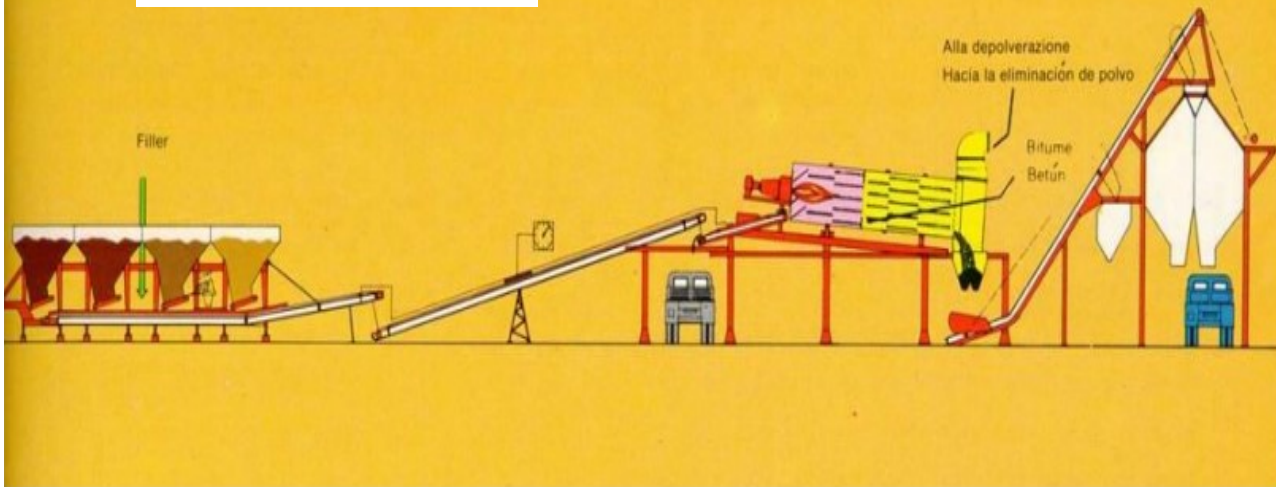
Il metodo tradizionale, prevede un unico cilindro con la doppia funzione di riscaldamento e miscelazione. La miscelazione del materiale avviene all'interno del tamburo essiccatore che, proprio per assolvere a questa funzione, è assai più lungo, fungendo contemporaneamente da essiccatore e da mescolatore. La netta separazione tra processo di miscelazione e di essiccazione, si traduce in notevoli vantaggi in termini di qualità di miscelazione ed emissioni dei gas di scarico.

L'essiccatore opera a circuito chiuso, pertanto, l'aria di scarico non viene inquinata da vapori del bitume o dal filler. Il mescolatore è separato dal processo termico, dunque il processo di miscelazione è impostabile in modo ottimale per la miscelazione; tutte le altre aggiunte, come fibre o RA, avvengono lontano dal riscaldamento. Non occorrono quindi compromessi nel processo ed ogni singola fase è regolabile in modo ottimale e indipendente.

Non rilevando poi una fase di selezione degli aggregati, è necessario porre particolare attenzione, affinché le varie classi non subiscano contaminazioni nel dosaggio. Il numero minimo di tramogge di alimentazione dipende dalle frazioni granulometriche impiegate per ogni miscela: la maggior parte degli impianti è dotata di 5-6 tramogge, al di sotto delle quali sono localizzati dei nastri estrattori muniti di celle di carico. Gli aggregati così dosati, vengono scaricati su un nastro collettore dotato di un sistema di pesatura automatica per il controllo continuo della loro massa. Essendo aggregati umidi, si deve determinare la percentuale di umidità in modo da verificare la corretta aggiunta di bitume.

Il cilindro essiccatore-miscelatore lavora in modalità a flussi "concorrenti", secondo cui gli aggregati, immessi nel tamburo dal lato del bruciatore, vengono progressivamente essiccati e riscaldati mentre scorrono verso il lato opposto di fuoriuscita, allontanandosi dunque dalla fiamma in modo "concorde" con i gas di scarico, al fine di mantenere il punto di ingresso del legante a una sufficiente distanza dalla fiamma (per evitarne la combustione o l'eccessiva ossidazione).

Figura 30: Processo impianto continuo



Questo però, è un problema importante perché se gli aggregati hanno lo stesso verso della fiamma, sono sempre più difficili da riscaldare. Viceversa, nell'impianto discontinuo, l'aggregato si avvicina con moto controcorrente e garantisce un riscaldamento graduale con un minore dispendio di energia. La miscela lapidea rimane all'interno del cilindro per un tempo generalmente compreso tra 3 e 4 minuti, in relazione alla sua lunghezza, alla velocità di rotazione, all'angolo di inclinazione, alle dimensioni degli aggregati. Un altro problema che si crea nel cilindro, è che l'umidità presente negli aggregati, viene spinta dall'aria calda nella seconda parte di esso, per poi uscire con i fumi e filler residuo che di conseguenza intasano i filtri. Una volta prodotto il conglomerato, viene portato attraverso un contenitore dentro un silos di stoccaggio, posto affianco al cilindro in modo da poterlo caricare su dei camion. Inoltre, non essendo presente né la torre di mescolazione né gli elevatori, il sistema si semplifica notevolmente, con una conseguente riduzione dei costi di manutenzione, ecco spiegato il motivo di utilizzo di questo tipo di impianto.

Negli ultimi anni però, date le problematiche, si è lasciato invece più spazio a impianti dove, nel cilindro, si lascia solo l'operabilità di riscaldamento, mettendo un mescolatore esterno che consenta una modalità di riscaldamento differente con un risparmio energetico. In questo tipo di impianto l'unità di miscelazione è dotata di palette opportunamente sagomate, che provvedono a mescolare gli aggregati caldi col bitume, eventuali additivi e infine filler, in modo da realizzare un flusso ininterrotto. Questo sistema, consente di invertire i flussi all'interno al cilindro essiccatore poiché non è presente il bitume. Tradotto, la ventola e il bruciatore sono disposti nella parte opposta rispetto all'ingresso degli aggregati, avendo un riscaldamento omogeneo.

I possibili problemi nella produzione dei conglomerati bituminosi sono:

- Alimentazione degli aggregati: negli impianti discontinui vengono rifezionati nella torre di miscelazione, ma questo non implica che non ci possano essere errori nell'assortimento granulometrico; i contenitori interni degli aggregati caldi, hanno capacità molto piccole quindi, se il pre-dosaggio non è corretto, si possono quindi riempire i contenitori degli aggregati più grandi, lasciando vuoti quelli piccoli;
- Temperatura della miscela: c'è un intervallo di idoneità, né troppo calda, né troppo fredda; per poter addensare il bitume, deve essere ancora morbido intorno a 130-140°C. Se troppo alta invece, comporta un consumo di energia superiore e può anche provocare un danneggiamento del bitume irrigidendolo e rendendolo difficile da compattare. La strada ne risentirà, dato che la pavimentazione sarà più fragile in esercizio.
- Umidità: gli aggregati devono essere asciutti, in modo che la pellicola di bitume possa aderire perfettamente sugli aggregati poiché la presenza di acqua crea problemi di adesione. Un dosaggio elevato nel cilindro essiccatore può consentire di non realizzare perfettamente l'essiccazione del materiale (problema frequente nel drum mixer).

## 1.7 MIX DESIGN

Con il termine mix design, si intende l'insieme di attività di studio e di laboratorio che consente di definire la composizione ottimale di una miscela (assortimento granulometrico, dosaggio del bitume ed eventuali additivi), nel rispetto delle prescrizioni di capitolato e delle prestazioni richieste nel progetto esecutivo. La granulometria, viene scelta in funzione dello strato in cui la miscela viene utilizzata e dell'indice dei vuoti da ottenere, adeguando i componenti fintanto che non si raggiungono le caratteristiche desiderate. È altrettanto noto, che il proporzionamento degli aggregati disponibili, con le correzioni necessarie per l'ottenimento del volume desiderato di vuoti nella miscela, rappresenta uno dei passaggi più importanti e complicati del processo di progettazione delle miscele. Difatti la proporzione dei costituenti, è il risultato finale di una serie di attività complesse che implicano la conoscenza approfondita delle tecnologie produttive e costruttive, delle proprietà dei materiali e delle procedure di prova per la determinazione delle grandezze.

La quantità di bitume è stabilita in funzione della superficie specifica degli inerti, della lavorabilità e delle condizioni ambientali (in base alla temperatura media della zona varia il tipo di bitume) in cui dovrà essere impiegato il conglomerato bituminoso, con percentuali che generalmente sono comprese tra il 4% e il 5% per gli strati di collegamento.

Le procedure di studio che portano alla definizione di una miscela, seguono precisi protocolli che provengono dall'esperienza sul campo; tra i tanti, hanno avuto maggior applicazione nel nostro Paese il metodo Marshall ed il più recente metodo volumetrico.

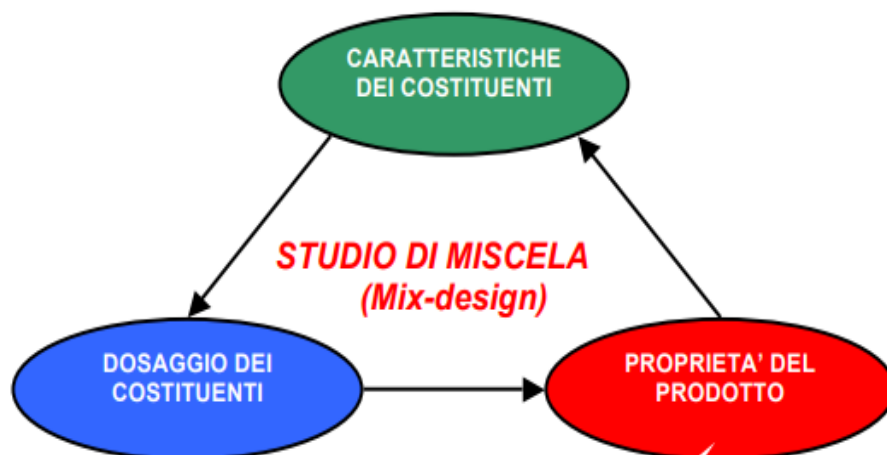


Figura 31: Processo nello studio della miscela

## **CAPITOLO 2: *Programma sperimentale***

In questo capitolo si descrivono le fasi operative condotte presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura” dell’Università Politecnica delle Marche, illustrando il piano sperimentale e i suoi obiettivi, le tipologie dei materiali utilizzati e le procedure delle prove effettuate.

L’obiettivo del programma sperimentale è quello di confrontare le caratteristiche meccaniche e prestazionali di quattro differenti tipologie di conglomerato bituminoso, realizzate utilizzando diverse tipologie di bitume modificato.

In questo studio si vuole osservare l’effetto che il polverino di gomma ha sulle proprietà del conglomerato bituminoso. I parametri di confronto sono:

1. il modulo di rigidezza;
2. la resistenza all’accumulo di deformazione permanente;
3. il carico di rottura.

I primi due parametri sono valutati rispettivamente con l’analisi del fenomeno di creep (deformazione di un materiale sottoposto a sforzo costante), mediante prove effettuate con il NAT (*Nottingham Asphalt Test*); il terzo invece, valutato tramite la prova di trazione indiretta tramite ITS.

La sperimentazione si è svolta in quattro fasi principali:

- FASE 1: preparazione della “ricetta”, rispettando i diversi quantitativi delle differenti pezzature degli aggregati;
- FASE 2: miscelazione attraverso l’ausilio di impastatrice, compattazione tramite fustella giratoria;
- FASE 3: determinazione delle caratteristiche geometriche dei provini e calcolo dei vuoti presenti;
- FASE 4: esecuzione delle varie prove, al fine di valutare le caratteristiche meccaniche.

Ultimato l’iter sperimentale, si è proceduto con la fase di elaborazione dei dati ottenuti e al confronto dei risultati, per poter valutare vantaggi e carenze dell’utilizzo di tre conglomerati

bituminosi con bitumi modificati e polverino di gomma (Drenoval Rubber), rispetto ad un conglomerato bituminoso con bitume modificato con solo SBS.

## **2.1 MATERIALI**

Verrà fornita una descrizione dei vari materiali, per poi passare ai dettagli relativi alle miscele in questione.

Gli aggregati lapidei sono particelle granulari di origine minerale, che trovano impiego nelle costruzioni stradali, sia in forma sciolta sia in combinazione con leganti di varia natura e tipologia. Il processo di qualificazione degli aggregati coinvolge diversi elementi. Questi comprendono, da un lato la caratterizzazione del materiale attraverso lo svolgimento di prove sperimentali per la determinazione delle principali proprietà fisiche, chimiche e meccaniche, dall'altro la definizione di opportuni criteri di classificazione e accettazione, in relazione alla destinazione d'uso finale.

Gli aggregati lapidei hanno origine dalle rocce e possono trovarsi in depositi naturali (soprattutto sotto forma di sabbie e ghiaie), formati attraverso un complesso insieme di fenomeni chimico-fisici, oppure essere prodotti mediante estrazione da cava. Oltre agli aggregati lapidei, esistono anche altri prodotti di origine artificiale o da riciclo, utilizzati in tutto o in parte come aggregati nelle costruzioni; si citano al riguardo le scorie ottenute da processi industriali, i detriti derivanti da demolizioni edilizie, il materiale fresato ricavato da pavimentazioni esistenti, i rifiuti di varia natura. Tali materiali alternativi, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie e in ragione di istanze di carattere ambientale, sono sempre più diffusi in campo stradale.

Le rocce da cui si originano gli aggregati possono essere distinte nelle seguenti classi:

- ignee;
- sedimentarie;
- metamorfiche.

Le rocce ignee sono caratterizzate da una struttura cristallina e si formano per raffreddamento da masse fuse incandescenti (magma). Possono essere ulteriormente suddivise in:

- intrusive, caratterizzate da un lento processo di raffreddamento;
- vulcaniche, a rapido raffreddamento.

Le rocce sedimentarie invece, derivano da processi esogeni e si trovano generalmente in forma stratificata per effetto degli effetti di sedimentazione.

Le rocce metamorfiche invece, derivano da rocce ignee o sedimentarie derivanti entrambe dall'azione di calore, pressione e attività chimiche che ne hanno alternato la struttura minerale, rendendola differente da quella originale.

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

	Strato Binder	
Unità di misura	%	m [g]
% Bitume	4,7-4,9	455,9-475,3
Pezzatura	%	m [g]
Sabbia 0/6	39	3605,2
Graniglia 4/8	19	1756,4
Pietrisco 8/12	8	739,5
Pietrisco 12/25	32	2958,1
Filler Omya	2	184,9

Tabella 1: Quantità e pezzature della miscela

La prima tipologia di materiale descritto è l'aggregato calcareo, presente nella miscela della presente sperimentazione.

Il calcare è una roccia sedimentaria costituita essenzialmente da calcite, un minerale formato da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). La forma e la giacitura di queste rocce, cioè il modo in cui sono disposte rispetto alla superficie terrestre, risentono delle caratteristiche del loro processo di formazione e di eventuali successivi fenomeni di deformazione. I processi di formazione delle rocce calcaree, differiscono sostanzialmente per l'origine dei sedimenti costituenti: questi, infatti, possono derivare (calcarei organogeni) da gusci o da esoscheletri, cioè dagli scheletri esterni di organismi che vivono nelle acque dei mari e degli oceani.

L'estrazione di questo materiale, avviene prevalentemente in cave lungo corsi d'acqua e sono presenti più o meno in tutte le regioni italiane. Questo rende il calcare uno dei materiali più utilizzati in particolar modo in ambito stradale.



Figura 32: Sabbia 0/6

Campione	Sabbia 0-6				
	Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
		0	0,0	0,0	100,0
31,5		0	0,0	0,0	100,0
20		0	0,0	0,0	100,0
16		0	0,0	0,0	100,0
12,5		0	0,0	0,0	100,0
8		0	0,0	0,0	100,0
4		30,2	2,6	2,6	97,4
2		288,7	24,9	27,5	72,5
1		321,6	27,8	55,3	44,7
0,5		187,1	16,2	71,5	28,5
0,25		81	7,0	78,5	21,5
0,125		74,4	6,4	84,9	15,1
0,063		54	4,7	89,6	10,4
FONDO		120,2	10,4		

Peso totale Inerte	1157,2
--------------------	--------

Tabella 2: Sabbia 0-6



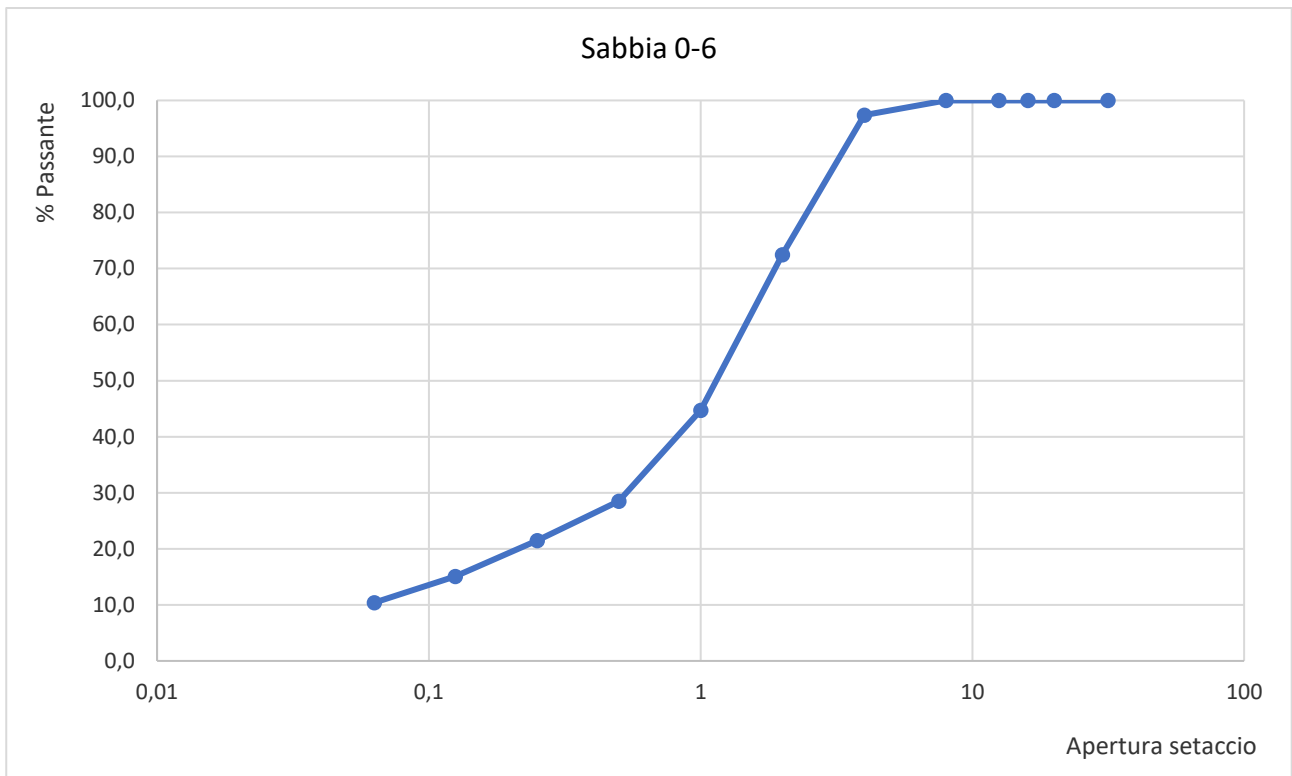


Figura 33: Granulometria sabbia 0-6

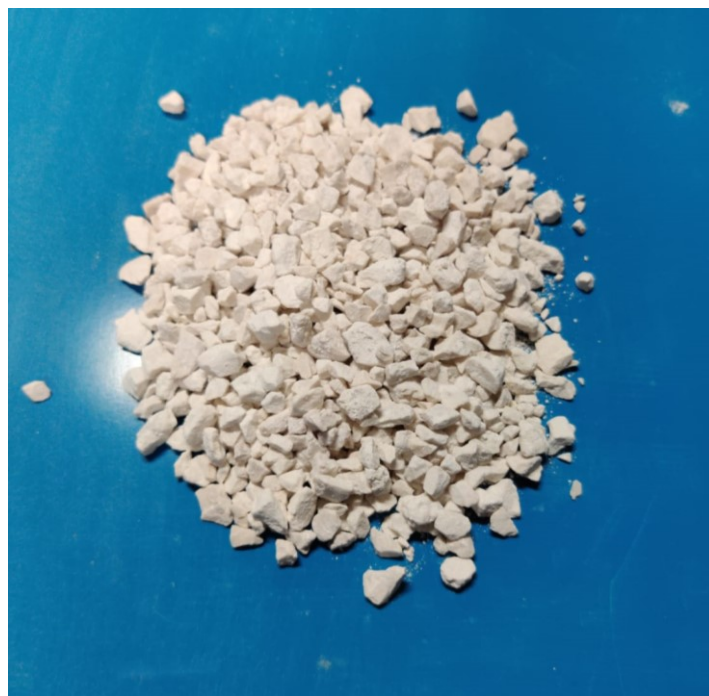


Figura 34: Graniglia 4/8

Campione	Graniglia 4-8			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	0	0,0	0,0	100,0
4	684,8	77,0	77,0	23,0
2	169,2	19,0	96,0	4,0
1	19,6	2,2	98,2	1,8
0,5	0	0,0	98,2	1,8
0,25	0	0,0	98,2	1,8
0,125	0	0,0	98,2	1,8
0,063	0	0,0	98,2	1,8
FONDO	16,2	1,8		

Peso totale Inerte **889,8**

Tabella 3: Graniglia 4/8

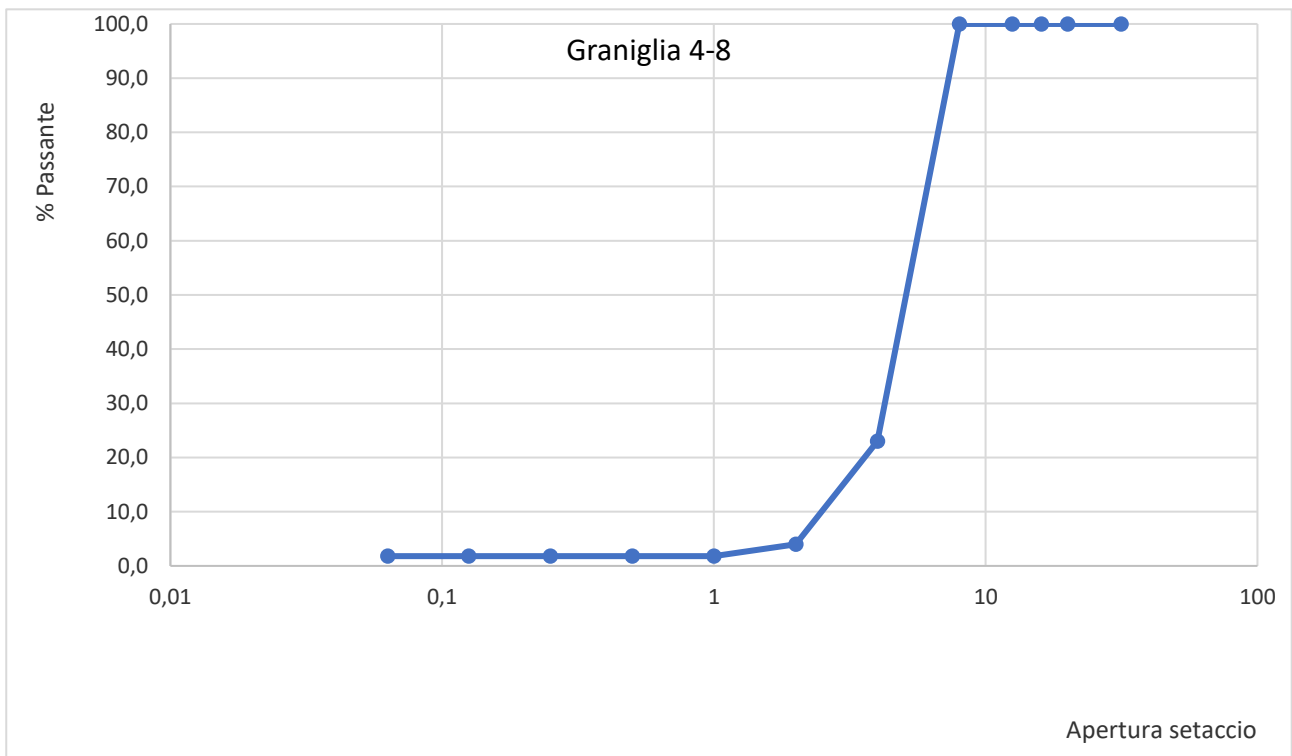


Figura 35: Granulometria graniglia 4/8

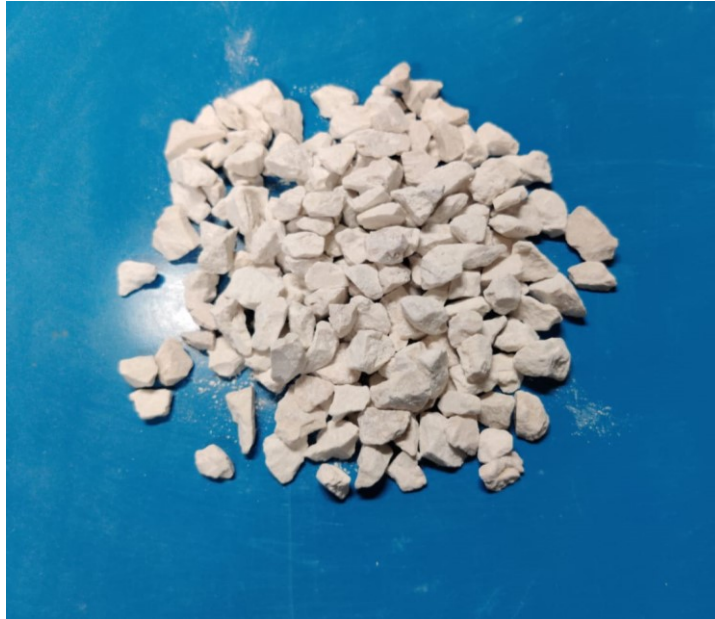


Figura 36: Pietrisco 8/12

Campione	Pietrisco 8-12				
	Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
		0	0,0	0,0	100,0
	31,5	0	0,0	0,0	100,0
	20	0	0,0	0,0	100,0
	16	0	0,0	0,0	100,0
	12,5	0	0,0	0,0	100,0
	8	800,1	71,6	71,6	28,4
	4	305,3	27,3	98,9	1,1
	2	0	0,0	98,9	1,1
	1	0	0,0	98,9	1,1
	0,5	0	0,0	98,9	1,1
	0,25	0	0,0	98,9	1,1
	0,125	0	0,0	98,9	1,1
	0,063	0	0,0	98,9	1,1
FONDO		11,9	1,1		

Peso totale Inerte	1117,3
--------------------	--------

Tabella 4: Pietrisco 8/12

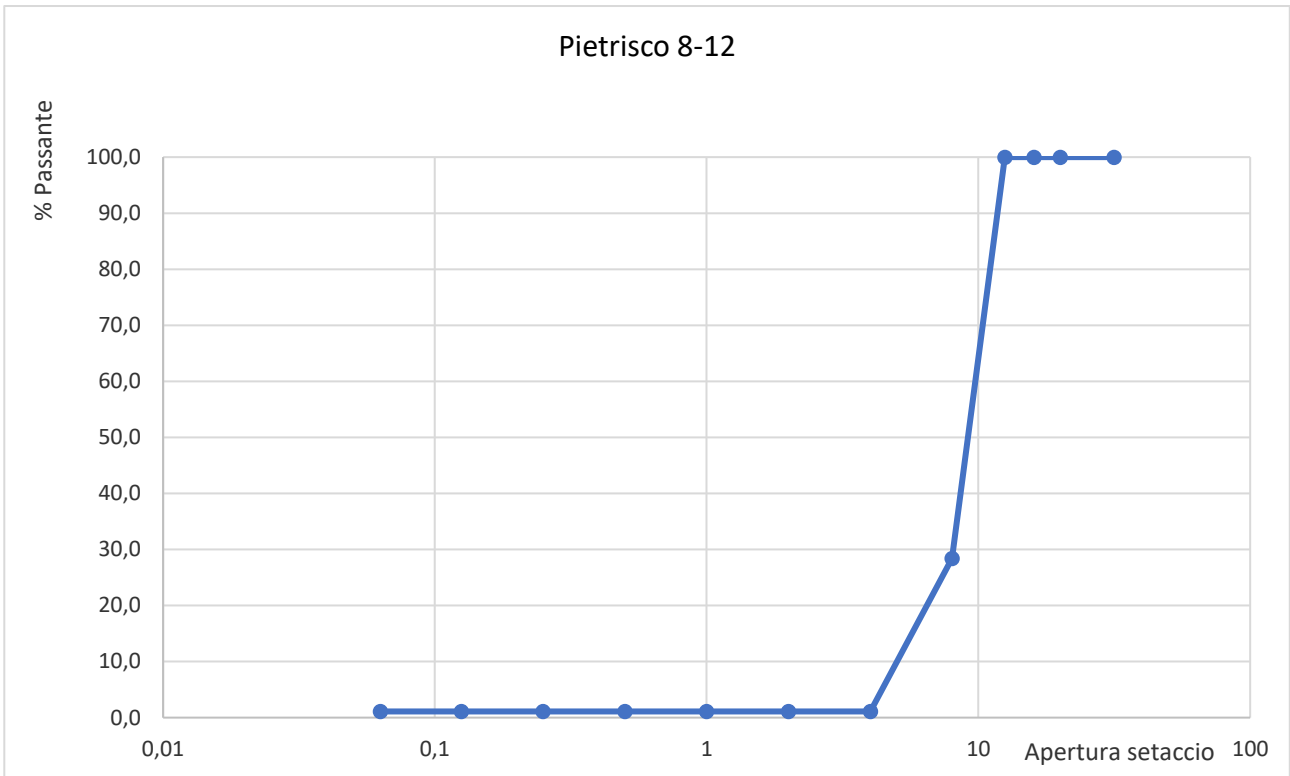


Figura 37: granulometria pietrisco 8/12

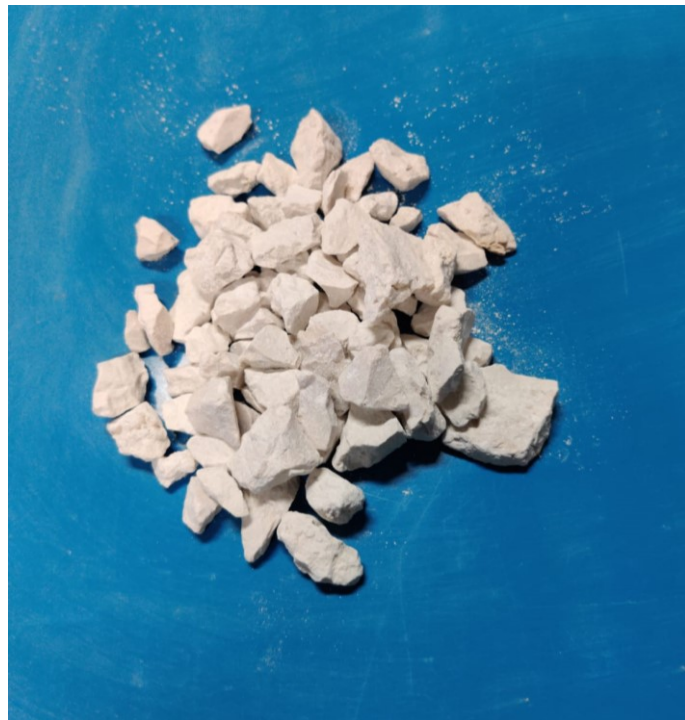


Figura 38: Pietrisco 12/25

Campione	Pietrisco 12-25			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	72,8	5,0	5,0	95,0
16	400,3	27,4	32,4	67,6
12,5	604,8	41,4	73,8	26,2
8	354,1	24,3	98,1	1,9
4	11,1	0,8	98,9	1,1
2	5,3	0,4	99,3	0,7
1	0	0,0	99,3	0,7
0,5	0	0,0	99,3	0,7
0,25	0	0,0	99,3	0,7
0,125	0	0,0	99,3	0,7
0,063	0	0,0	99,3	0,7
FONDO	11	0,8		

Peso totale Inerte **1459,4**

Tabella 5: Pietrisco 12/25

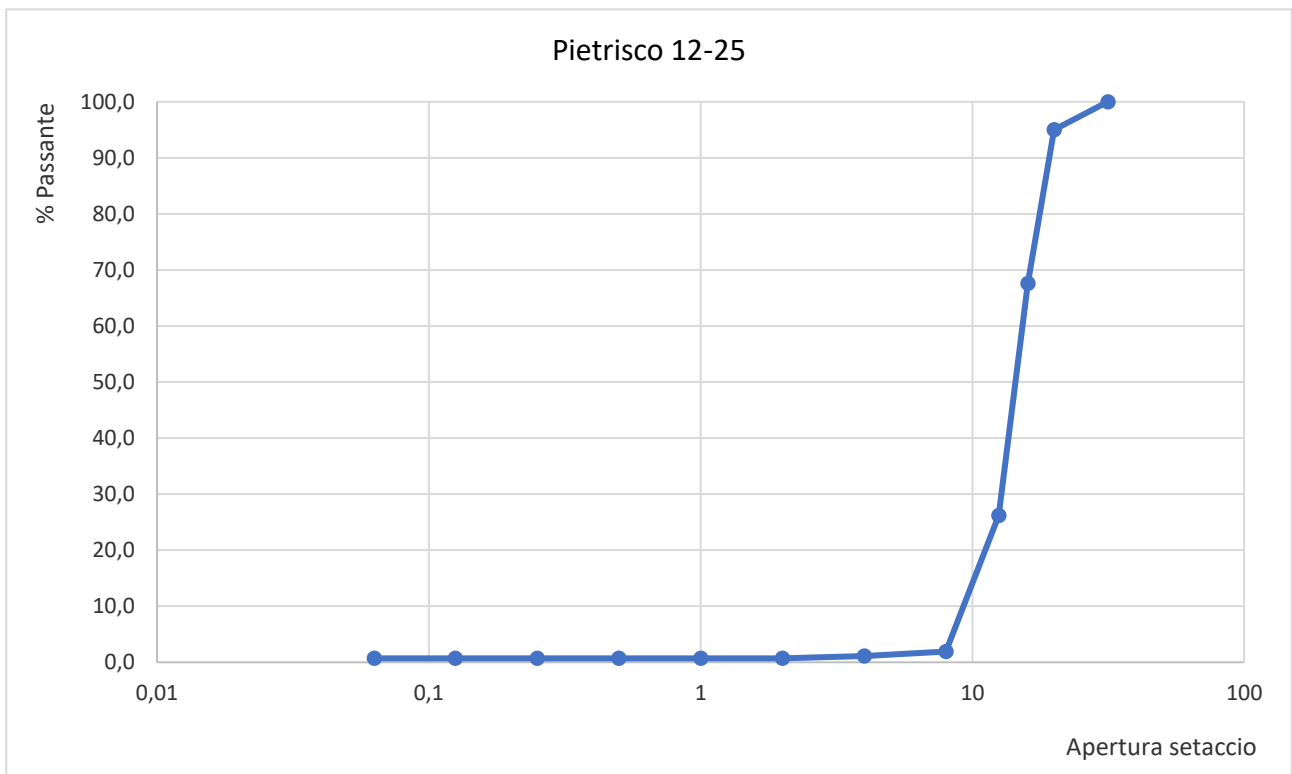


Figura 39: granulometria pietrisco 12/25

Con il termine “filler” viene indicata quella frazione di aggregato di dimensioni ridottissime. Può derivare da produzione industriale mirata, ma è ottenibile anche dalla frantumazione e abrasione della superficie di aggregati, i quali tendono ad urtarsi reciprocamente durante le fasi di lavorazione e movimentazione. Il termine filler si traduce letteralmente in “riempitivo” infatti, viste le sue dimensioni, tende ad occupare gli spazi lasciati dagli aggregati più grandi. Esso costituisce una categoria particolare di aggregato in quanto, per le sue caratteristiche dimensionali, influisce non solo sulla granulometria di una miscela, ma interagisce anche con la fase legante, migliorando alcune delle proprietà dei conglomerati bituminosi come la stabilità, rigidità e l’adesione bitume-aggregato, particolarmente importante nel caso vengano impiegati aggregati silicei. Dalla norma CNR 139, il filler è la frazione di aggregato con dimensioni minori di 0.075 mm. Nella normativa UNI EN 933-1, invece, il filler è il passante al setaccio da 0,063 mm, anche se è comunque consentita una tolleranza del 20% di trattenuto al setaccio da 0,075 mm. La funzione del filler nel conglomerato bituminoso è quello di conferirgli una certa plasticità dopo essersi unito al bitume.



*Figura 40: Filler*

Campione	Filler Omya			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	0	0,0	0,0	100,0
4	0	0,0	0,0	100,0
2	2	1,0	1,0	99,0
1	6	3,0	4,0	96,0
0,5	9,2	4,6	8,6	91,4
0,25	10,6	5,3	13,9	86,1
0,063	33,2	16,6	30,5	69,5
FONDO	139	69,5		

Peso totale Inerte	200
--------------------	-----

Tabella 6: Filler

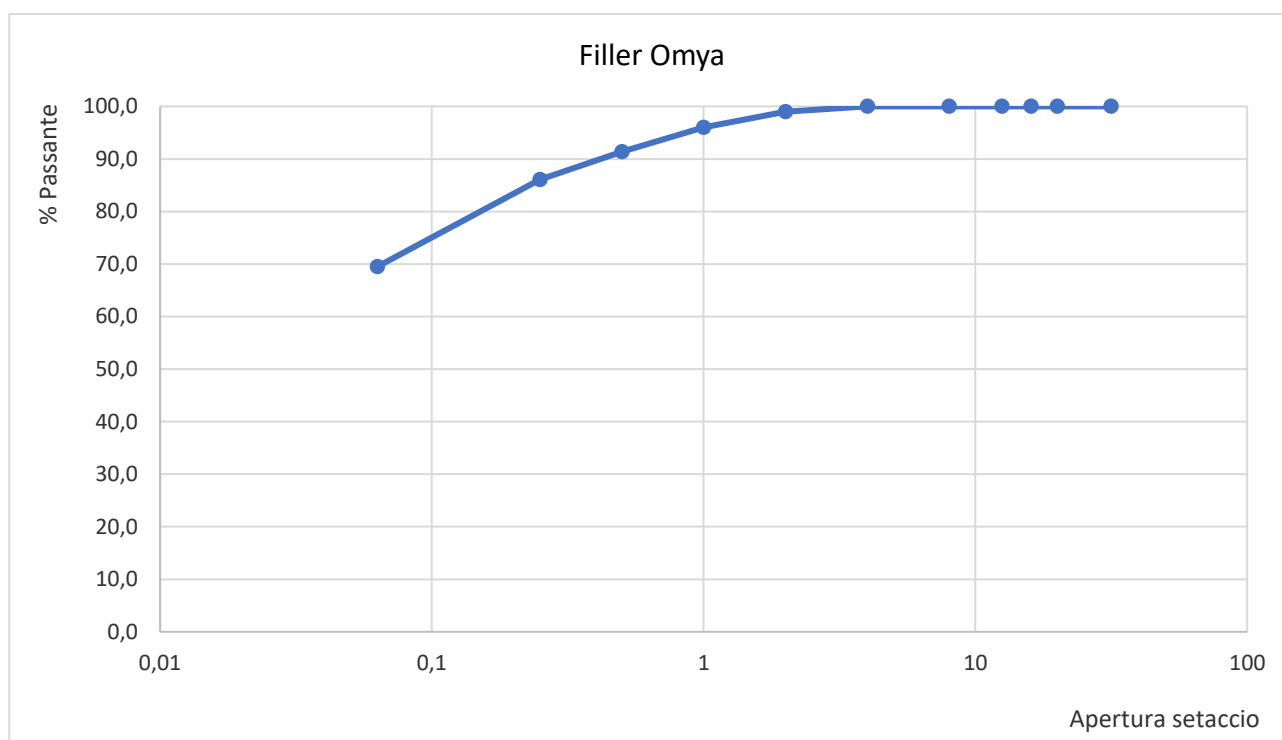


Figura 41: Granulometria filler

I quattro bitumi modificati sono:

- A. A: bitume 70/100 additivato con SBS e compound in rapporto 60/40 (5% in peso sul bitume)
- B. B: bitume 70/100 additivato con SBS e compound in rapporto 80/20 (5% in peso sul bitume)
- C. C: bitume 70/100 additivato con SBS
- D. D: bitume 70/100 additivato con compound (6% in peso sul bitume)

Il compound è costituito da polimeri SBS, in forma lineare oppure in forma radiale, olio e polverino di gomma in parti uguali.

Il dosaggio del compound è scaturito dall'obiettivo di ottenere un punto di rammollimento di oltre 70 °C ed un ritorno elastico di oltre il 75%, come normalmente avviene per i bitumi modificati con polimeri di tipo hard.



Figura 42: immagine di bitume generico



## 2.2 MISCELAZIONE E COMPATTAZIONE DEI PROVINI

In fase di mix design, si sono ricavati i quantitativi delle differenti pezzature di aggregato, necessarie a realizzare l'impasto e successivamente pesati tramite un'apposita bilancia, la quale è stata utilizzata per ogni miscela, così da eliminare errori derivanti dall'utilizzo di più apparecchiature. Si pesano gli aggregati tramite delle teglie che poi vengono poste in forno a una temperatura di 170°C per 3 ore, in modo da eliminare l'umidità presente in essi e raggiungere la temperatura di miscelazione.

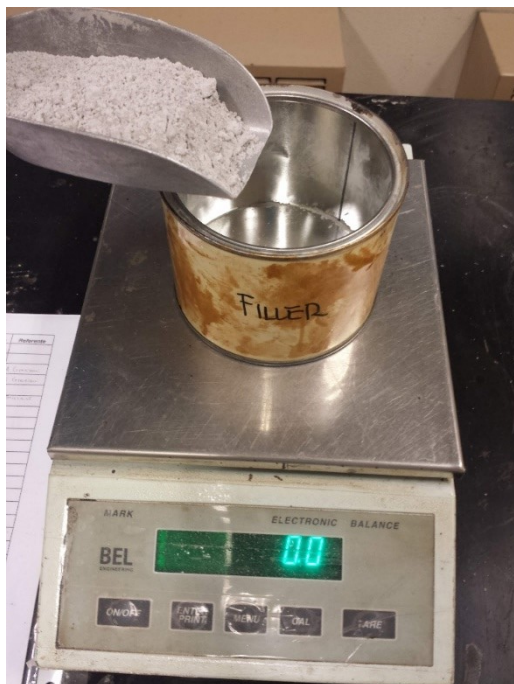


Figura 43: Dosaggio materiale



Figura 44: Forno utilizzato

Insieme agli inerti vengono poste in forno le fustelle, utilizzate poi nella giratoria, allo scopo di fargli raggiungere la temperatura degli inerti ed evitare indesiderate escursioni termiche, le quali possono danneggiare la qualità del provino finito (non sono previste tempistiche standard all'interno del forno). Il bitume invece viene inserito nello stesso forno, alla stessa temperatura degli aggregati, per circa 70-90 minuti, ovvero il tempo necessario per renderlo liquido.

Al termine delle 3 ore, si procede alla fase successiva di miscelazione degli inerti con il bitume, all'interno dell'impastatrice anch'essa ad una temperatura di 170°C. Grazie alla pala vengono prima miscelate le differenti pezzature per 30 secondi, poi viene aggiunto il bitume per 2 minuti e infine viene aggiunto il filler che viene fatto miscelare per 3 minuti. Inoltre, bisogna prestare attenzione nella fase di inserimento del bitume nel recipiente, poiché la quantità di bitume nella lattina è maggiore di quella da dosare, pertanto si procede valutando con una bilancia esterna la quantità di bitume versata volta per volta.



*Figura 45: aggregati miscelati*



*Figura 46: inserimento del bitume*



*Figura 47: aggiunta del filler*

Terminata anche l'ultima fase della miscelazione, si estrae il conglomerato bituminoso dal recipiente dell'impastatrice e lo si va a suddividere, quanti sono i provini da realizzare, all'interno a dei vassoi. Questa operazione viene effettuata per la realizzazione dei provini, in quanto attraverso l'utilizzo di una bilancia si andrà a mettere in ognuna delle teglie 1100 gr di impasto. Dopo aver suddiviso il materiale nelle varie teglie, lo si ripone nuovamente in forno per 30 minuti, in modo tale che il conglomerato raggiunga nuovamente la temperatura di miscelazione (170°C): quest'ultimo passaggio è mirato all'emulazione del processo di stoccaggio del conglomerato bituminoso nei vari macchinari, prima che esso venga steso sulla pavimentazione stradale.



*Figura 48: suddivisione miscela*

La compattazione dei provini è stata realizzata mediante pressa giratoria a taglio, un'apparecchiatura introdotta alla fine degli anni '50, costituita da un telaio di carico con un supporto inclinabile all'interno, dove viene posta la fustella contenente il materiale da compattare, rappresentando così un'importante innovazione per le tecniche di costipamento dei conglomerati bituminosi per le sperimentazioni in laboratorio. Mediante un pistone di carico, viene applicato il carico verticale e la fustella viene fatta ruotare per mezzo di una base rotante generando una sollecitazione di taglio, favorendo perciò l'addensamento. Si promuove la riorganizzazione interna dei granuli grazie all'applicazione di un'azione combinata di sollecitazioni normali e tangenziali che mutano continuamente di direzione a causa della rotazione eccentrica della fustella contenente il materiale e che simulano quindi più fedelmente le azioni. Il metodo basato sulla pressa a taglio giratoria, coniuga i vantaggi della semplicità esecutiva, con l'esigenza di riprodurre condizioni di addensamento rappresentative di quelle reali: infatti con i metodi che si utilizzavano in precedenza, basati esclusivamente su un'azione di tipo impulsivo e verticale, si ottenevano condizioni di addensamento ben lontane da quelle che si verificano in sito durante la rullatura.

Il macchinario è dotato di un sistema di acquisizione e controllo dei dati attraverso un display ed è possibile impostare se la prova debba avvenire a numero di giri imposto o ad altezza imposta. In primis va impostata la pressione verticale costante (600 kPa), il diametro della fustella utilizzata (100 mm) mentre, per la compattazione dei provini, si procede andando ad impostare il numero di giri (100 giri) e grazie al pannello di controllo, si informa l'altezza ottenuta.



Figura 49: Pressa di taglio giratoria



Per eseguire poi la prova, una volta suddiviso il materiale, in ordine con in quale vengono inserite nel forno, si prendono le teglie per inserire il conglomerato all'interno della fustella. La fase di preparazione di ogni singola fustella, precedentemente inserita nel forno, prevede che si inserisca in essa una piastra di base ed un dischetto di carta-filtro per evitare l'adesione del provino alla piastra stessa. Il materiale all'interno delle teglie si inserisce nelle fustelle dove si ripone un altro dischetto di carta-filtro per identificare il provino e l'ordine di esecuzione, evitando che il conglomerato aderisca alla piastra superiore.



*Figura 50: riempimento della fustella*

Una volta che la fustella è pronta, viene rapidamente trasportata all'interno del telaio di carico, si posiziona sul piano, si gira fino a farla aderire ad una tacca metallica e si avvia la prova tramite il pannello di controllo, premendo il tasto "START".

Si procede alla compattazione, impostando il numero di giri e settando i seguenti parametri:

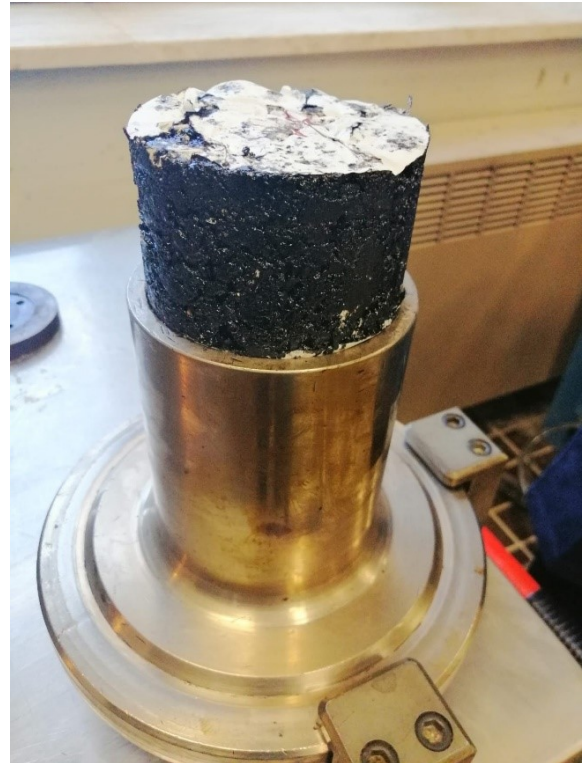
- Pressione: 600 KPa;
- Diametro della piastra: 100 mm;
- Numero di giri: 100.

Una volta iniziata la prova, il pistone scende lentamente comprimendo il materiale tramite la pressione fissata. Grazie ai sostegni laterali, la fustella si inclina e inizia a ruotare fino al raggiungimento del numero di giri pre-impostato. Terminata la prova, il pistone risale, dando la possibilità di estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.

Si conclude la preparazione dei provini grazie all'estrazione effettuata tramite un martinetto idraulico, che lo solleva verso l'alto. Infine, i provini vengono fatti raffreddare.



*Figura 51: compattazione in opera*



*Figura 52: provino pronto*

## 2.3 DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETA' VOLUMETRICHE

I conglomerati bituminosi sono composti da due fasi principali: la fase solida, formata da aggregati e legante e fase gassosa, cioè aria. Ai rapporti volumetrici tra queste fasi, sono direttamente collegate molte proprietà prestazionali del conglomerato bituminoso.

Ogni granulo di aggregato è ricoperto da bitume, che in parte penetra nei pori superficiali riconosciuto come "bitume assorbito" e in parte invece va a costituire il "bitume effettivo", che forma una sottile pellicola di ricoprimento. I vuoti del conglomerato bituminoso, sono dati dal volume intergranulare occupato dall'aria e possono essere determinati in diversi modi.

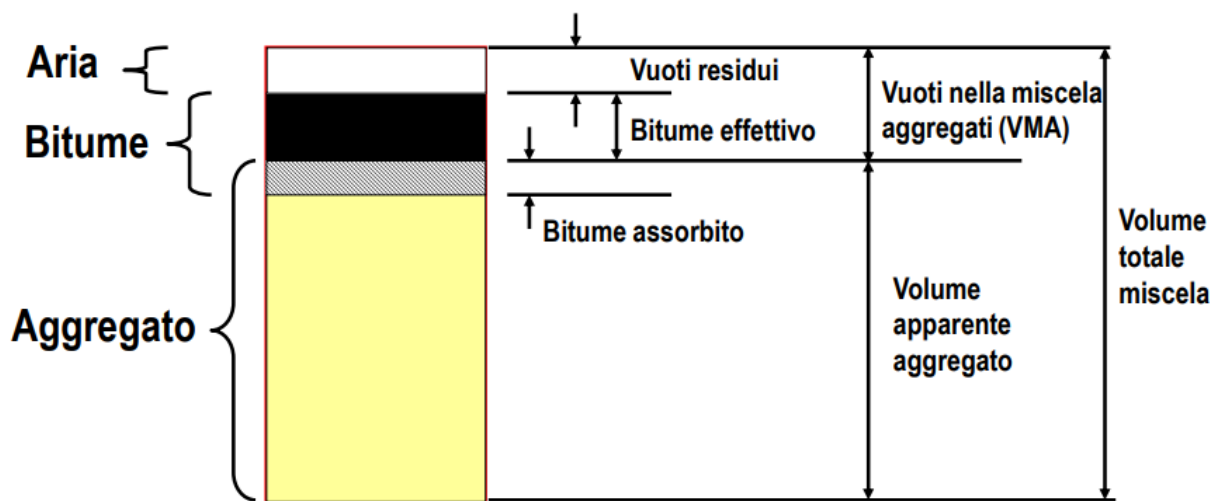


Figura 53: fasi conglomerato bituminoso

In questo paragrafo sono spiegate le prove impiegate in questa sperimentazione, per il calcolo delle proprietà volumetriche delle quattro miscele prodotte.

### ➤ *Determinazione massa volumica massima (UNI EN 12697-5)*

Si definisce per massa volumica massima di un conglomerato bituminoso, la massa per unità di volume senza vuoti d'aria ad una temperatura nota. In riferimento alla norma UNI EN 12697-5, la massa volumica massima  $\rho_m$  è stata valutata come:

$$\rho_m = \frac{100}{\left(\frac{p_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)}$$

dove:

- $\rho_m$  = massa volumica massima [kg/m<sup>3</sup>]
- $p_a$  = percentuale di aggregati nella miscela [m/m]
- $\rho_a$  = massa volumica apparente degli aggregati [kg/m<sup>3</sup>]
- $p_b$  = percentuale di legante nella miscela [m/m]
- $\rho_b$  = massa volumica del legante a 25°C [kg/m<sup>3</sup>]

➤ *Determinazione massa volumica apparente metodo geometrico (UNI EN 12697-6)*

Per massa volumica apparente, si intende la massa per unità di volume inclusi i vuoti d'aria di un provino a temperatura nota. Per valutare la massa volumica apparente geometrica, è stata applicata la procedura D della normativa UNI EN 12697-6: tale procedura prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri (l'altezza del provino viene determinata tramite un calibro, figura 60) e di determinare la massa del campione secco. La massa volumica geometrica dei provini cilindrici si calcola:

$$\rho_{b,geom} = \frac{m_1}{h \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^6$$

dove:

- $\rho_{b, geom}$  = massa volumica apparente del provino [Kg/m<sup>3</sup>]
- $m_1$  = massa del provino [g]
- $h$  = altezza media del provino [mm]
- $d$  = diametro del provino [mm]



Figura 54: determinazione della massa

➤ *Determinazione massa volumetrica apparente metodo dry (UNI EN 12697-6)*

La procedura A, invece, prevede una prima misura della massa del campione secco ( $m_1$ ); poi si misura la massa del provino in acqua ( $m_2$ ), utilizzando un cestello per la pesata idrostatica. In questo modo, nota la densità dell'acqua alla temperatura di prova, si determina la massa volumica "dry"  $\rho_{bdry}$  come segue:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_w$$

dove:

- $\rho_b$ : massa volumica apparente del provino in kg/m<sup>3</sup>;
- $m_1$ : massa del provino asciutto in g;
- $m_2$ : massa del provino in acqua in g;
- $\rho_w$ : massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova





Figura 55: pesata idrostatica

➤ *Determinazione volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)*

La determinazione delle proprietà volumetriche delle miscele studiate, è stata basata sul contenuto dei vuoti residui dei provini compattati, in relazione a quanto prescritto nella norma UNI EN 12697-8. Avendo calcolato le due masse volumiche apparenti per ciascun provino, sono state calcolate due tipologie di volume dei vuoti:

$$V_{m,geom} = \frac{\rho_m - \rho_{bgeom}}{\rho_m} \cdot 100$$

$$V_{m,dry} = \frac{\rho_m - \rho_{bdry}}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- $\rho_m$  = massa volumica massima [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_b$  = massa volumica del legante a 25°C [kg/m<sup>3</sup>]

La procedura di determinazione della massa volumica apparente viene elencata direttamente dalla norma. Come primo passaggio, viene determinata la massa del provino secco pesato in aria, si trasferisce nel cestello all'interno del secchio contenente l'acqua e viene misurata la temperatura dell'acqua poiché in funzione di essa viene applicato un coefficiente k.



Figura 56: misurazione della temperatura

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 7: fattori di correzione

## 2.4 PROVA DI MODULO A TRAZIONE INDIRECTA (ITSM)

La prima prova di caratterizzazione meccanica, svolta sulle quattro miscele, è stata mirata alla misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM). Per la misurazione di questo modulo, è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester).

Questo macchinario, imprime un carico di compressione lungo una direzione e tramite dei trasduttori consente di misurare la deformazione a  $90^\circ$ , rispetto al punto di applicazione del carico. Le modalità di sperimentazione, effettuata mediante questa apparecchiatura, sono stabilite dalla normativa UNI EN 12697-26 che impone una deformazione preimpostata. Per ogni provino è previsto che la prova venga effettuata su un diametro, mentre per solo quattro provini presi a campione, viene effettuata su due diametri l'uno girato di  $90^\circ$  rispetto l'altro. Dunque, la misura del modulo di rigidezza avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta, in cui il provino non è portato a rottura.

I parametri della prova sono regolati e controllati mediante un software, attraverso il quale si possono settare: il tempo di picco (rise time=124 ms), il carico fissato (20 KN), la deformazione di target fissata (in questo caso  $3 \mu\text{m}$ ) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson (0,35) e la temperatura della prova (sempre intorno ai  $20^\circ\text{C}$ , grazie alla presenza di un termometro). Questi parametri da definire, sono tarati prima della fase di condizionamento, procedendo la vera e propria prova. Il modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso, caratterizza la capacità di una miscela di deformarsi in conseguenza a delle tensioni dovute all'applicazione di un carico. Il parametro ITSM, definisce al meglio il comportamento meccanico e reologico dei conglomerati bituminosi.

Il modulo di rigidezza del campione viene determinato attraverso l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Inoltre, esso è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del tempo di picco, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson.

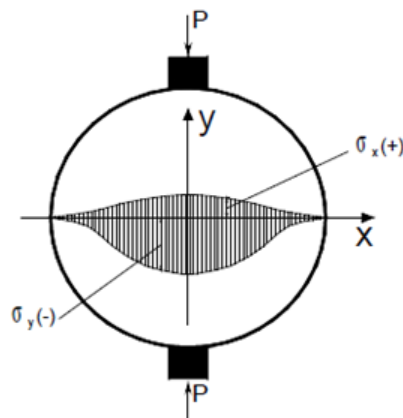


Figura 57: Stato sollecitante provino sottoposto durante prova

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

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

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

dove:

- P = carico applicato;
- D = diametro del campione;
- T = spessore del campione.

La determinazione del modulo di rigidezza elastica, in funzione delle sollecitazioni teoriche, può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato tensionale biassiale. La deformazione orizzontale  $\epsilon_x$  dell'elemento è:

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

dove:

- $\nu$  = il coefficiente di Poisson;
- E = il modulo elastico del materiale.

Grazie alle espressioni ricavate, sostituite nella precedente formula e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni  $\Delta$  si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ha:

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

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

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

Per garantire la correttezza della prova, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile. Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- temperatura: la formula per il calcolo del modulo E, risulta valida se quest'ultimo risulta uniforme sia a compressione che a trazione, ma solo per temperature al sotto di 25°C.
- tempo di picco: la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico, a causa della natura viscoelastica del legante.

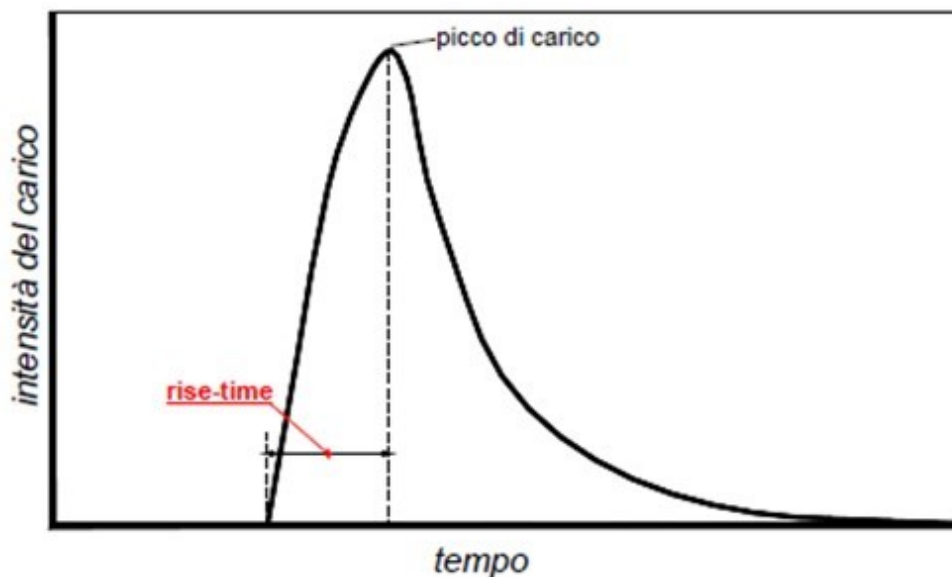


Figura 58: applicazione del carico in funzione del tempo

- deformazione orizzontale imposta: le proprietà meccaniche del conglomerato, a causa del comportamento non lineare, dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova.
- numero di colpi di condizionamento iniziale: se si utilizzano un numero basso di colpi si registrano tempi di prova più brevi, ma allo stesso tempo diminuisce l'affidabilità delle misurazioni.

Il macchinario è collegato a un computer per poter registrare tutti i dati che si ottengono, ma anche per controllare le modalità di svolgimento della prova, andando a regolare il funzionamento della cella di carico.

Il primo strumento che viene utilizzato all'interno del NAT può essere descritto grazie alla figura sottostante:

- 1) viti per la corretta posizione dei trasduttori, il quale vengono bloccati grazie a esse;
- 2) trasduttori che devono entrare a contatto con il provino per determinare le deformazioni;
- 3) telaio utilizzato per posizionare il provino da testare, precedentemente condizionati termicamente a 20°C per un tempo sufficiente, come espresso dalla norma UNI EN 12697-26;
- 4) morsetti per disporre all'interno del telaio il provino e favorire il suo bloccaggio;
- 5) canale per consentire il corretto posizionamento del provino;
- 6) barre posizionate a un'un'altezza che è funzione del diametro del provino, permettendo di posizionare i trasduttori alla metà di esso;
- 7) viti che tengono in posizione tali barre;
- 8) leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori durante la fase di applicazione dei carichi.

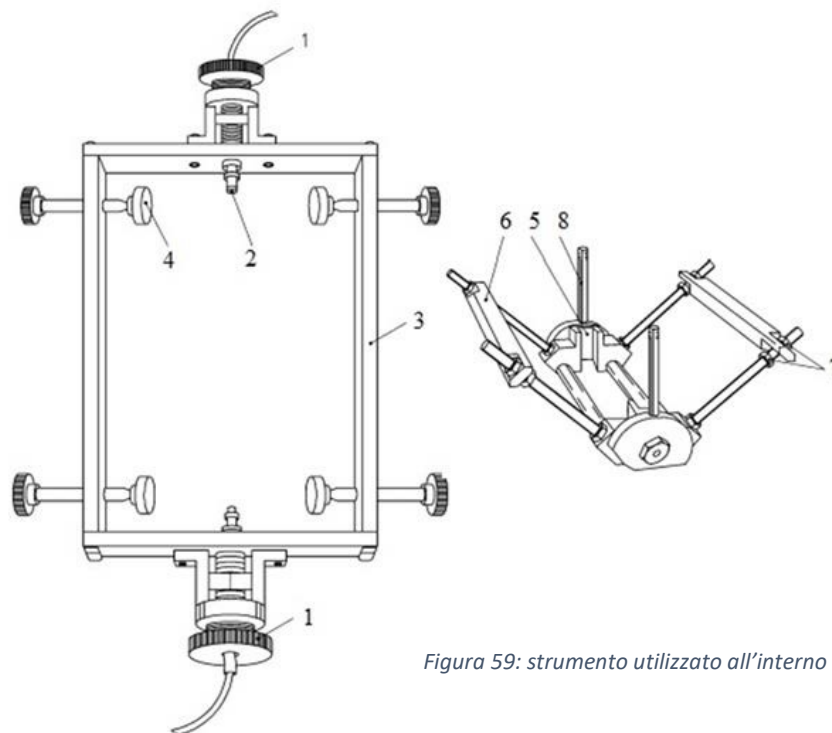


Figura 59: strumento utilizzato all'interno del NAT

Uno degli elementi principali del NAT, è la cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 KN. Essa è collegata al pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico che è a contatto sul provino. Inoltre la cella di carico è anche collegata al computer attraverso il quale si possono sia registrare i dati, ma anche controllare le modalità di svolgimento della prova andando a regolare il funzionamento della cella di carico.



*Figura 60: cella di carico NAT*

La corretta posizione del pistone, si ha in funzione delle dimensioni del provino testato, in questo caso 100mm. Il sistema di contrasto è collegato rigidamente a delle viti che ne permettono lo scorrimento verso l'alto se invece il provino è di 150mm (riferito alla figura 60).

All'interno della cella di carico poi viene inserito il castelletto con i rispettivi trasduttori, iniziando quindi il procedimento nel computer. Tramite il collegamento di quest'ultimi al computer, è possibile misurare con elevata precisione le deformazioni del campione testato, a seguito della sollecitazione applicata sullo stesso. Il tutto è contenuto in una camera climatica per regolare la temperatura di prova, nel rispetto delle prescrizioni della norma (20°C).



Come primo passaggio da effettuare, è l'inserimento dei parametri in precedenza descritti nel programma ITSM-EN. Vanno inseriti i dati del singolo provino:

- Diametro specifico: 100 mm;
- Altezza media: data dalla media delle 4 misure e variabile a seconda del provino (dato che è stato impostato il numero di colpi e non l'altezza nella pressa giratoria a taglio).



*Figura 61: determinazione altezza media del provino tramite calibro*

Mentre gli altri parametri fissi per tutti i provini di tutte le miscele sono:

- Coefficiente di Poisson: valore normato pari a 0,35;
- Tempo di carico di picco: tempo con il quale il macchinario impiega a applicare il carico di picco, pari a 124 ms;
- Deformazione di target orizzontale: deformazione che si raggiunge tramite il macchinario, pari a 3  $\mu\text{m}$ ;
- Numero di colpi: numero di impulsi necessari a raggiungere una deformazione di 3  $\mu\text{m}$ .

Procedendo viene indicata la densità del provino, che però è influente alla determinazione del modulo di rigidezza e si arriva così a effettuare il contatto della barra di carico con il pistone, per l'applicazione del carico.



Si passa dopodiché alla schermata del controllo dei trasduttori, che vengono posizionati all'interno delle viti (elemento n°1 della figura 58), andando a favorire il contatto con il provino. Andando poi a ruotare quest'ultime si allenta l'aderenza con esso, affinché le frecce sul software siano rosse.

Infine vengono abbassate le leve (elemento n°8 della figura 58), per non andare ad influenzare il risultato della prova, facendo avviare i 10 colpi di precarico che anticipano i 5 impulsi finali. Per ogni impulso, il software registra tutti i parametri in precedenza descritti con i rispettivi valori medi, ottenendo così il modulo elastico a trazione indiretta del provino di ogni miscela.

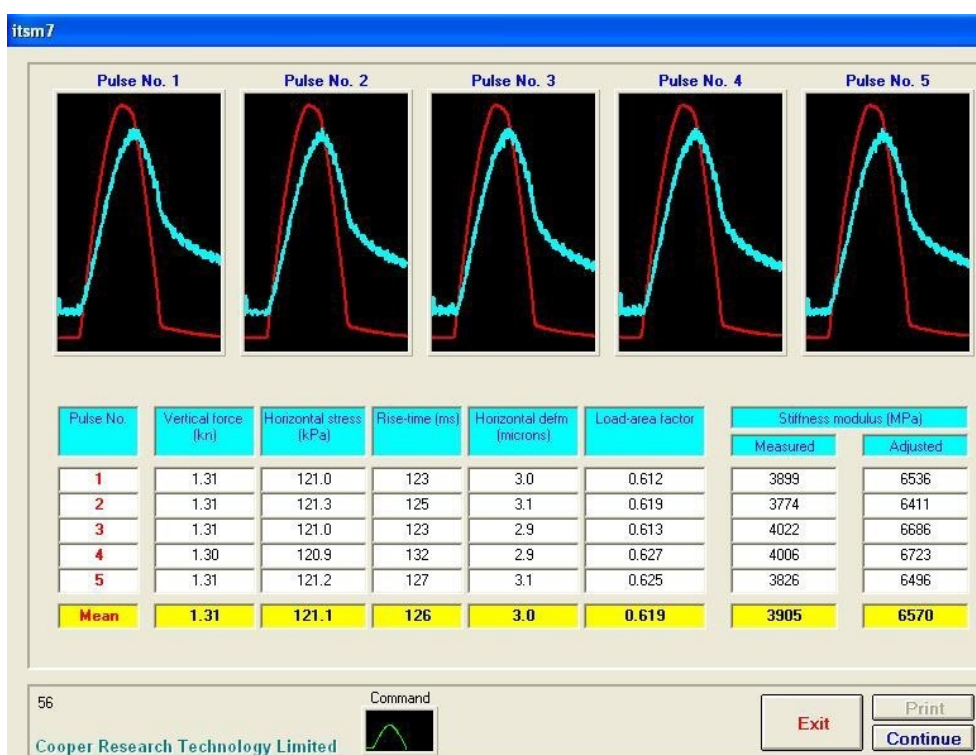
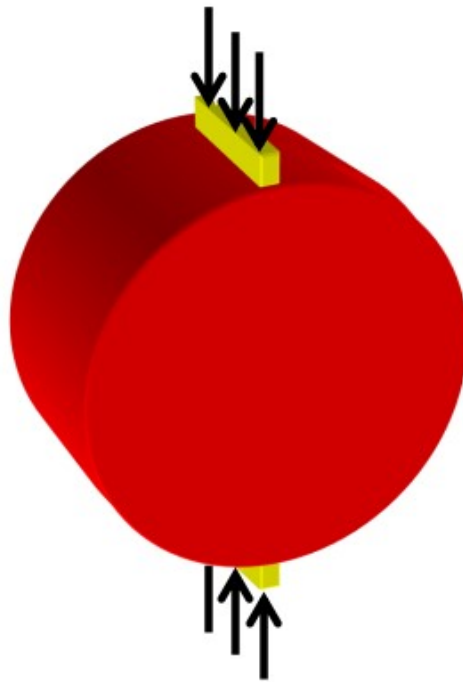


Figura 62: schermata finale con valori di ITSM

In conclusione, il modulo di rigidezza rappresenta la capacità del conglomerato di redistribuire le tensioni negli strati sottostanti: uno degli scopi della pavimentazione, soprattutto dello strato di base e binder, è quello di fare da filtro nei confronti dei carichi. La parte superficiale della pavimentazione, assorbe i carichi e trasmette in profondità le tensioni distribuendole in un'area più grande. Maggiore è il modulo, maggiore è la capacità di redistribuire le tensioni.

## 2.5 PROVA DI TRAZIONE INDIRECTA (ITS)

La configurazione di trazione indiretta o nota anche come prova Brasiliana, consiste nell'applicazione di un carico di compressione, tramite due teste di carico che avanzano a velocità costante, causando la rottura del campione. Nel provino la rottura appare con una fessura lungo la stessa direzione di applicazione del carico: si chiama di trazione indiretta in quanto la sollecitazione che porta a rottura il provino, per effetto Poisson, è la trazione che si genera in direzione perpendicolare alla direzione di carico.

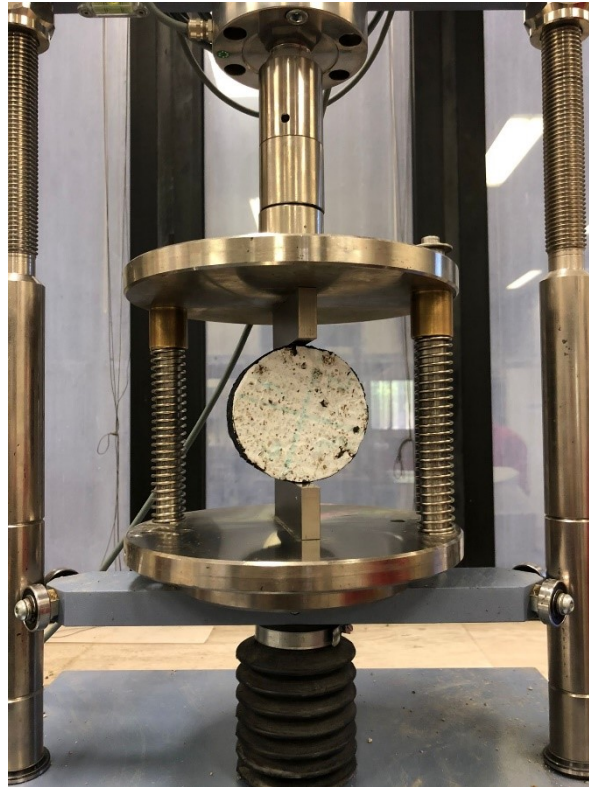


*Figura 63: come il carico è applicato al provino*

Dopo la determinazione dei moduli di resistenza a trazione indiretta, 4 provini vengono disposti all'interno di una camera climatica a 25°C per più di 3 ore, poiché la temperatura incide sul comportamento del materiale. Una volta prelevati dalla camera climatica, si posiziona il campione tra i piatti dello strumento, andando a centrare l'asse del provino. Il carico sul provino è applicato attraverso la testa di carico inferiore che, scorrendo verso l'alto attraverso due apposite guide, trova un contrasto rigido nella parte superiore, comprimendolo lungo il diametro. Il carico viene trasferito al provino da due listelli, con queste dimensioni:

- larghezza: 15±2 mm;
- spessore: 4±1 mm;
- lunghezza ≥ della lunghezza della linea di contatto del provino.

Altrimenti se il campione avesse avuto dimensioni di 150mm, sarebbero differenti e di conseguenza da sostituire.



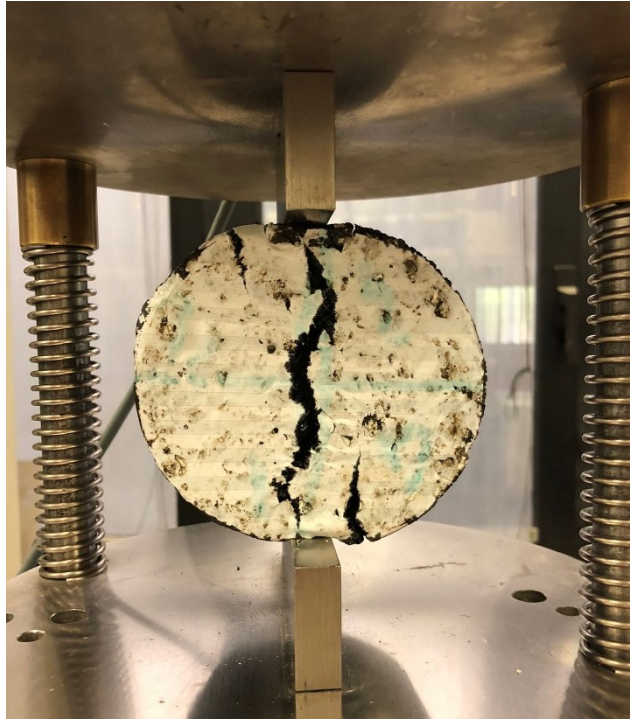
*Figura 64: posizione centrale provino tra i due listelli*

Una volta collocato il provino in maniera centrata sui listelli ed aver avviato il software UTM II, si vanno ad immettere i parametri richiesti nella schermata principale:

- Diametro del provino: 100 mm;
- Altezza media: in precedenza misurata;
- Identificazione provino: inserire il nome del provino.

A questo punto si avvia la pressa meccanica: il sistema di carico inferiore (piatti di carico), inizia ad avanzare ad una velocità di circa 50 mm/min e si arresta automaticamente quando registra una riduzione del carico massimo del 20%. Nella schermata del computer apparirà un grafico che traccia in tempo reale lo sforzo in funzione della deformazione, dando la possibilità poi al sistema di determinare i parametri a noi interessati:

- Carico di picco o di rottura (P);
- Deformazione causata dalla rottura (spostamento/diametro);
- Resistenza a trazione indiretta (ITS).



*Figura 65: rottura del provino*

La prova, come previsto dalla norma UNI EN 12697-23, avviene in controllo di deformazione.

La resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), ovvero la massima trazione applicata indirettamente al provino, può essere calcolata tramite formula matematica noto il carico P, ed è pari a:

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

dove:

- $P = P_{\max}$  = carico di picco [N]
- $t$  = altezza media del provino [mm]
- $d$  = diametro del provino [mm].

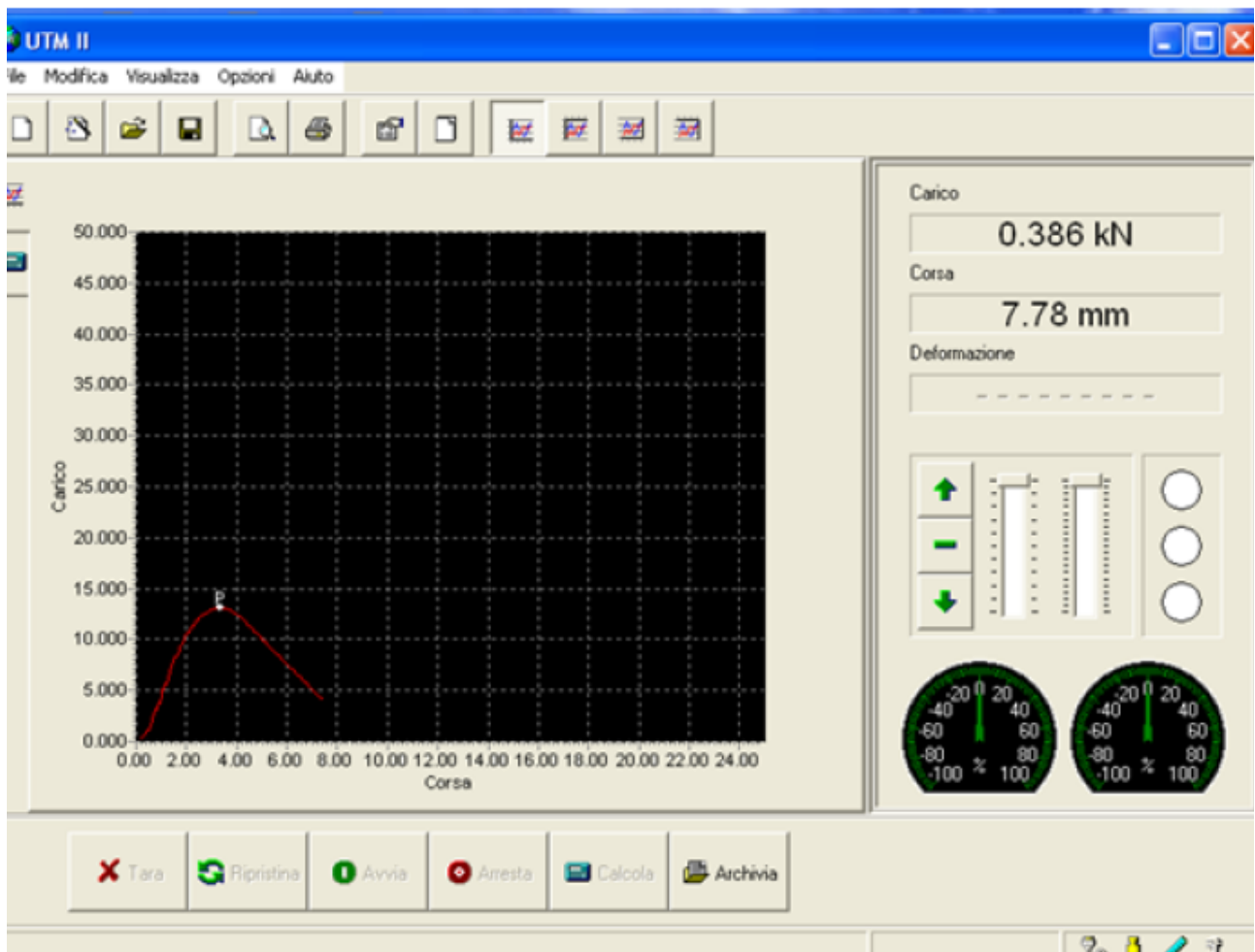


Figura 66: software UTM II

Dalla figura 66 si può analizzare la schermata che appare nel momento in cui si avvia la prova. Si forma un diagramma rappresentato dal carico applicato e dalla corsa; se all'avvio della prova ci dovesse essere uno stallo della curva, dovuto alla posizione delle piastre, comporta una variazione del valore della deformazione. Se così dovesse accadere, si apre il file excel relativo alla prova e si corregge andando ad eliminare quei valori inopportuni.

Durante l'esecuzione della prova inoltre, va anche verificata che la posizione della superficie di rottura sia centrata, in modo da evitare che ci siano dubbi sull'incertezza dei valori ottenuti e di conseguenza ripetere la prova.

## 2.6 PROVA DI FATICA (ITF)

Infine la terza fase di caratterizzazione meccanica di questa sperimentazione, si è posta l'obiettivo di determinare la resistenza a fatica del materiale. La resistenza a fatica di un materiale, è la capacità di sopportare sollecitazioni cicliche di intensità inferiore al carico, che porterebbe ad una rottura immediata del materiale, ma che con una determinata frequenza e per un determinato periodo portano al collasso del provino. Questa tipologia è molto importante per analizzare le caratteristiche del conglomerato bituminoso, in quanto permette una simulazione dei carichi veicolari che andranno a sollecitare ciclicamente la pavimentazione in esercizio. La resistenza a fatica dei materiali è quindi, uno dei parametri chiave nella progettazione strutturale delle pavimentazioni stradali. In questa sperimentazione è stata sviluppata sui 12 provini di ogni impasto rimanenti dalla prova ITS, facendo riferimento alla norma UNI EN 12697-24. Il provino inizialmente deve essere condizionato nella camera climatica a 20°C per almeno 8 ore, in modo tale che raggiunga la temperatura a cui deve essere effettuata la prova. Il macchinario utilizzato per lo svolgimento della prova a fatica è il NAT.

I parametri principali ottenibili dalla prova possono essere determinati come segue:

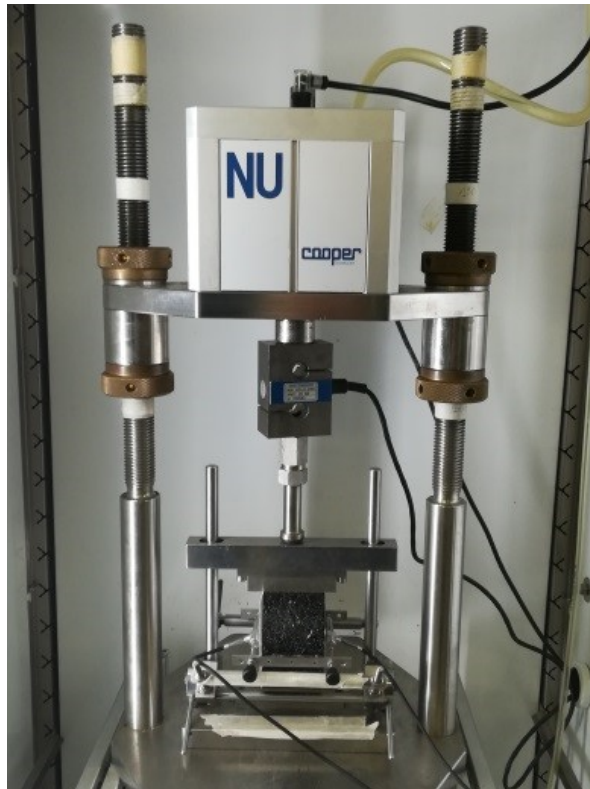
$$\sigma = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot \Omega} \quad \varepsilon = \left( \frac{2 \cdot \Delta H}{\Omega} \right) \cdot \left[ \frac{1 + 3\nu}{(\pi \cdot \nu) + 4 - \pi} \right]$$
$$\varepsilon_0 = \left( \frac{\Delta H}{\Omega} \right) \cdot 2,1 \quad S = \left( \frac{\sigma}{\varepsilon} \right) \cdot (1 + 3\nu)$$

dove:

- $\sigma$  = tensione sull'asse principale del provino [MPa]
- $P$  = carico misurato [N]
- $t$  = altezza del provino [mm]
- $\Omega$  = diametro del provino [mm]
- $\varepsilon$  = deformazione orizzontale [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
- $\Delta H$  = deformazione orizzontale [mm]
- $\nu$  = coefficiente di Poisson (=0,35)
- $S$  = modulo di rigidezza del materiale [MPa]



La prova ITF consiste nell'applicazione di un carico impulsivo di 0,1 secondi ad intervalli di 0,4 secondi. Si inizia con un determinato livello di carico e se la deformazione successiva ai primi 10 cicli non rientra nell'intervallo 100 a 400  $\mu\text{m}/\text{m}$ , la prova deve essere interrotta ed il carico modificato. Generalmente vengono definiti tre livelli di carico ( $\sigma=250/350/450$  tradotto come prova lenta, intermedia e veloce) per svolgere la prova e per ottenere un valore medio attendibile, per ogni livello di carico.



*Figura 67: apparecchiatura per prova ITF*

Il provino in questa prova, a differenza della prova per la valutazione dell'ITSM, deve essere dotato di due lamierini incollati in punti opposti lungo un diametro, poiché servono per la giusta posizione dei trasduttori, necessari alla misurazione delle deformazioni. Una volta applicati questi lamierini, il provino viene poggiato sul castelletto (differente da quello utilizzato per la determinazione dei moduli di resistenza a taglio) presente all'interno del macchinario e tenuto fermo dalla barra di carico su cui andrà ad agire il pistone. I trasduttori vengono posizionati grazie a delle viti che vengono inserite all'interno del lamierino e fissate grazie all'utilizzo di bulloni. Dopo aver allestito la prova e montato i trasduttori, si procede con l'apertura del software ITFT-EN.



Le prime schermate del programma, descrivono la procedura da svolgere per avviare la prova come ad esempio il posizionamento del provino, mentre la successiva schermata richiede l'immissione di dati quali:

- Temperatura: 20°C
- Diametro: 100 mm
- Altezza media: si differenzia da campione a campione
- Tensione da applicare: relativa al tipo di prova lenta, intermedia o veloce.

Dopo aver inserito i dati necessari richiesti, il software richiede il corretto posizionamento dei trasduttori: anche in questa prova, come per la prova di modulo, i trasduttori vengono regolati attraverso delle viti in precedenza descritte. La posizione corretta, è indicata attraverso lo stazionamento delle due lancette comparse nel monitor, nel tratto compreso tra i valori 1/1,5 e si ottiene andando a stringere o allentare la presa dei bulloni.

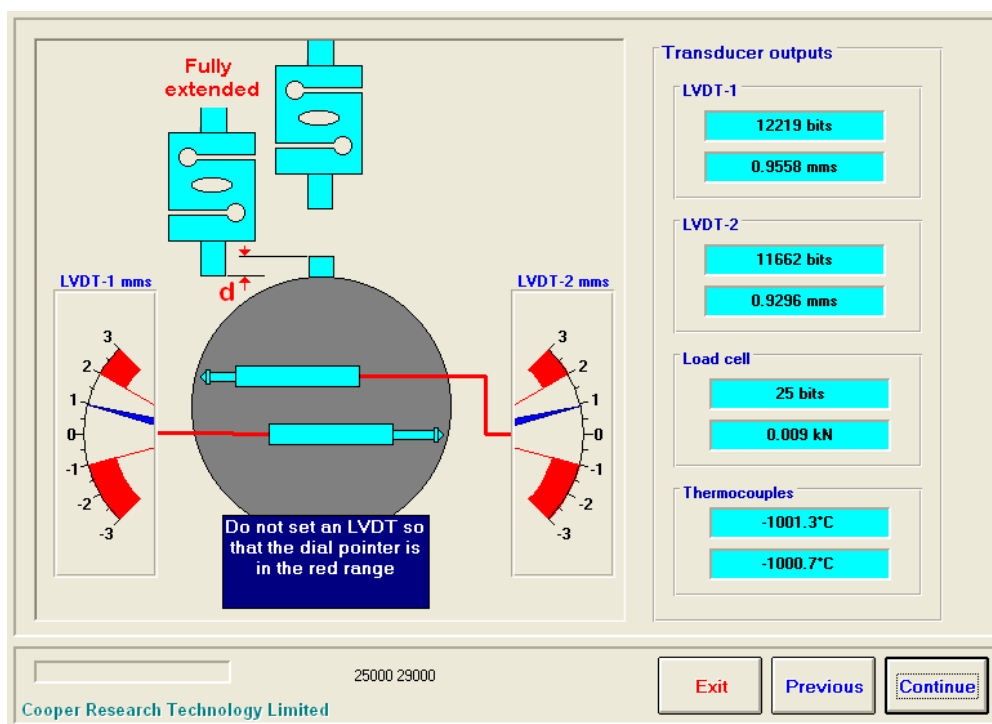
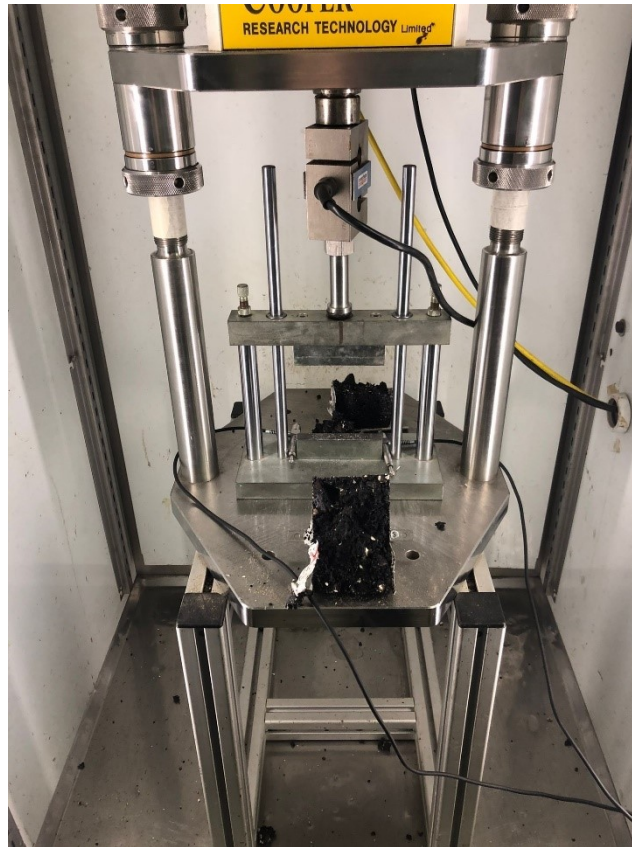


Figura 68: schermata relativa al corretto posizionamento dei trasduttori

A questo punto, cliccando sul tasto continua che è comparso sul monitor, il pistone andrà in posizione trovando il contatto con la barra di carico avviando automaticamente il test. Infine si segnerà il valore di deformazione dopo 115 cicli. Se avrò una prova veloce, il numero di cicli sarà minore rispetto a una prova lenta.

La prova si arresterà in due casi e automaticamente:

- Raggiungimento del punto di rottura del provino;
- Raggiungimento e superamento del numero di cicli prevista dalla norma UNI EN 12697-24.



*Figura 69: fine prova di fatica*

La prova in questione viene realizzata per lo studio delle deformazioni permanenti di una pavimentazione stradale dovuta a carichi ciclici, denominata ormaiamento, si sviluppa nella sovrastruttura per accumulo nel tempo di deformazioni irreversibili di piccola entità causate da forze cicliche. Tali deformazioni di piccola entità, rappresentano la risposta visco-elastica della miscela ai carichi dinamici ed in presenza della ripetizione del carico, vengono progressivamente accumulate fino alla creazione di un esteso stato deformativo della sovrastruttura.

## 2.7 REQUISITI DI CAPITOLATO

Le varie sperimentazioni affrontate all'interno del laboratorio, sono svolte in collaborazione ad imprese di costruzioni ed enti preposti al fine di affrontare problemi reali. Proprio per questo, durante la fase sperimentale dei conglomerati bituminosi, occorre far riferimento alle Specifiche Tecniche contenute nei Capitolati dei vari enti. Tali norme tecniche, hanno lo scopo di andar a determinare i requisiti di qualificazione ed accettazione in termini prestazionali sia dei singoli materiali, quali aggregati e leganti, sia della miscela finale.

In questa sperimentazione, il capitolato a cui si è fatto riferimento è il Capitolato Strade ANAS. Per quanto riguarda la miscela di aggregati, dovrà essere caratterizzata da una distribuzione granulometrica tale per cui essa rientri all'interno del fuso granulometrico previsto al capitolato d'appalto. Facendo riferimento allo strato di binder con bitume modificato, la distribuzione granulometrica con conseguente fuso granulometrico di riferimento, sono riportate nelle figure seguenti:

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

Figura 70: passante totale capitolato

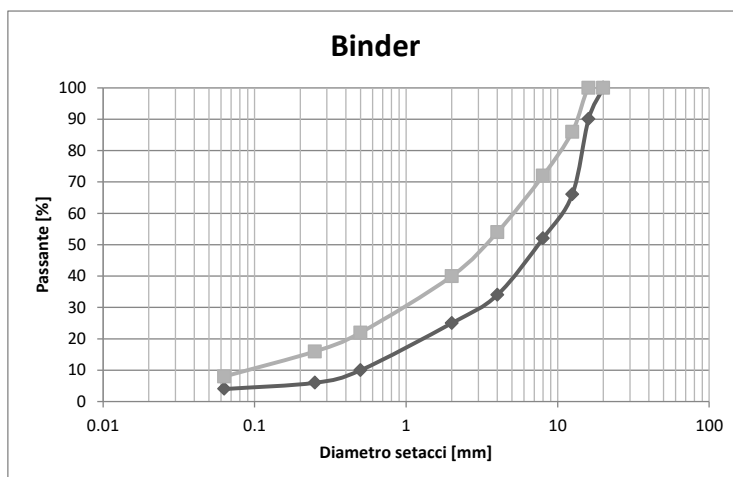


Figura 71: fuso granulometrico capitolato

Per i requisiti volumetrici, il parametro considerato è la percentuale di vuoti residui dopo la compattazione con la pressa a taglio giratoria, mentre per la caratterizzazione meccanica si valuta l'ITS. In tabella riportante le specifiche a cui si è fatto riferimento:

Proprietà	Valori richiesti
Vuoti residui [%]	3% - 6%
ITS [MPa]	0.72 - 1.45

Tabella 8: specifiche di capitolato relative a vuoti residui e valore di ITS

## **CAPITOLO 3: Analisi dei risultati**

All'inizio della sperimentazione, si sono determinate le curve granulometriche degli aggregati vergini ed il quantitativo ottimale di bitume, per poi proseguire con la realizzazione delle 4 miscele con differenti bitumi modificati. Successivamente, le miscele sono state analizzate attraverso gli strumenti ed i metodi già illustrati nel capitolo 2 ed infine, i risultati ottenuti devono essere confrontati. Tali risultati vengono riportati in questo capitolo per le singole miscele e per il confronto finale per poi esporre delle conclusioni a riguardo.

### **3.1 ANALISI GRANULOMETRICA**

La curva granulometrica di progetto, è stata determinata con riferimento al fuso granulometrico per aggregati, indicato nel Capitolato Strade ANAS per lo strato di Binder, riportato nel capitolo precedente. Il fuso in questione è costituito da due curve granulometriche ideali che individuano, per ogni setaccio, il passante minimo ed il passante massimo. Analizzando le percentuali delle singole frazioni granulometriche si ottiene la curva granulometrica di progetto. L'utilizzo di una singola tipologia di aggregato (calcareo) fa sì che tutti gli inerti possano considerarsi della stessa densità, così da dover definire una sola curva granulometrica. Per la percentuale di bitume vergine da aggiungere all'impasto si è scelto un valore che varia dal 4,7% in peso sull'aggregato per le prime due miscele, al 4,9% per le altre due. Queste percentuali di bitume, sono un contenuto minore rispetto al limite superiore imposto dal capitolato. Le percentuali di legante massimo per lo strato binder, è all'incirca il 5,8% del peso di bitume rispetto al peso degli aggregati lapidei, mentre quello minimo è il 4,3%. Le percentuali di bitume variano in funzione degli strati della pavimentazione stradale.

Setaccio [mm]	Singole Pezzature						Binder
	Sabbia 0-6	Graniglia 4-8	Pietrisco 8- 12	Pietrisco 12- 25	Pietrisco 25- 40	Filler Omya	
31,5	100	100	100	100	82,5	100	100,0
20	100	100	100	95	1,4	100	98,4
16	100	100	100	67,6	0,3	100	89,6
12,5	100	100	100	26,2	0,3	100	76,4
8	100	100	28,4	1,9	0,3	100	62,9
4	97,4	23	1,1	1,1	0,3	100	44,8
2	72,5	4	1,1	0,7	0,3	100	31,3
1	44,7	1,8	1,1	0,7	0,3	100	20,1
0,5	28,5	1,8	1,1	0,7	0,3	100	13,8
0,25	21,5	1,8	1,1	0,7	0,3	98,6	11,0
0,125	15,1	1,8	1,1	0,7	0,3	90,2	8,3
0,063	10,4	1,8	1,1	0,7	0,3	77,6	6,3
							<b>4,9%</b>
<b>Binder</b>	<b>39,0%</b>	<b>19,0%</b>	<b>8,0%</b>	<b>32,0%</b>		<b>2,0%</b>	<b>100,00%</b>

Tabella 9: passante relativo alla sperimentazione per ogni pezzatura

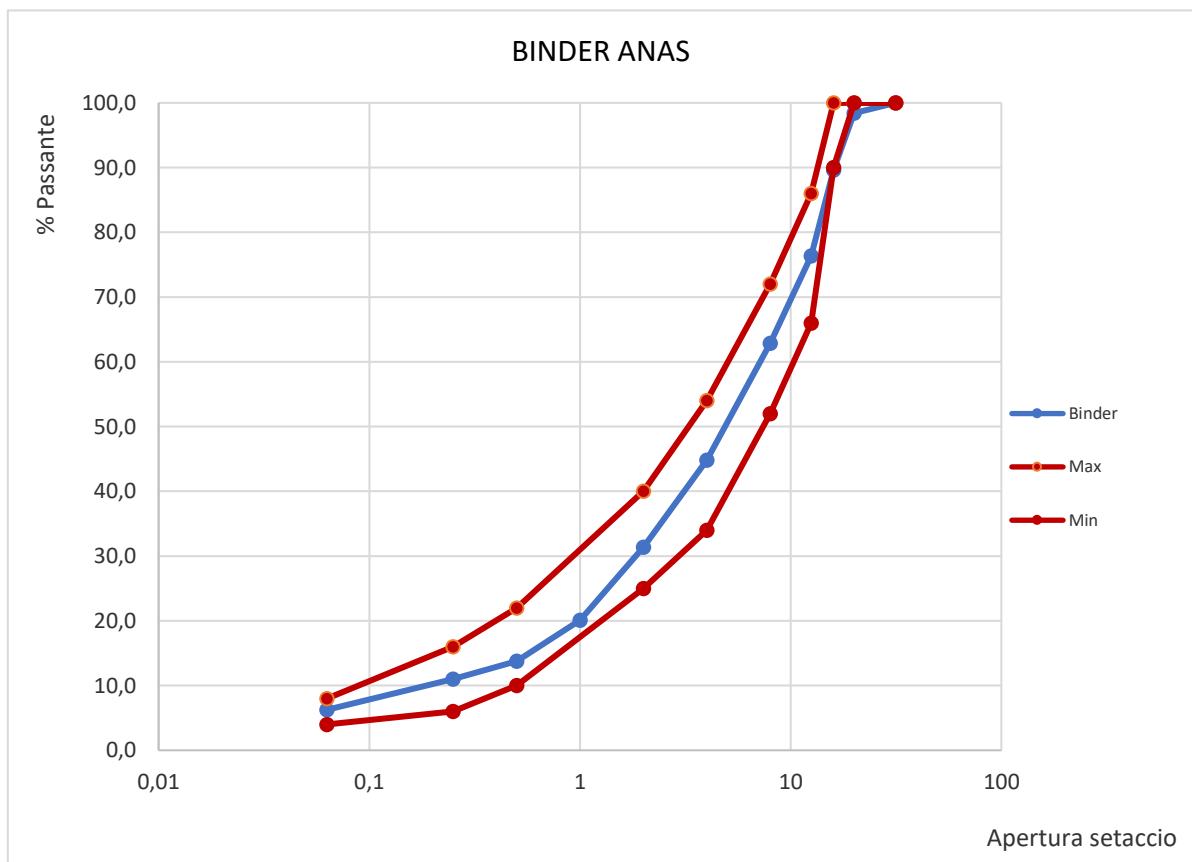


Figura 72: confronto curve granulometriche della sperimentazione con il capitolato

Come si può osservare dal grafico precedente, i fusi in rosso rappresentano i limiti massimo e minimo del passante riferito al capitolato (indicati nella tabella 10 e nella figura 72) delle varie pezzature utilizzate; la curva in blu rappresenta invece il passante delle varie dimensioni che si sono adoperate nella sperimentazione in questione.

Setaccio [mm]	Binder		
	ANAS A		
	Max	Min	Media
31,5	100	100	100
20	100	100	100
16	100	90	95
12,5	86	66	76
8	72	52	62
4	54	34	44
2	40	25	32,5
1			
0,5	22	10	16
0,25	16	6	11
0,125			
0,063	8	4	6

Tabella 10: limiti max e min relativi al capitolato

I valori per la realizzazione della curva granulometrica sono dovuti a queste quantità di aggregato:

	Binder	
	Mix	
%bit	4,7%	<b>455,9</b>
Pezzatura	% risp. Aggregati	m [g]
Sabbia 0/6	39,0%	3605,2
Graniglia 4/8	19,0%	1756,4
Pietrisco 8/12	8,0%	739,5
Pietrisco 12/25	32,0%	2958,1
Matrix	0,0%	0,0
Filler Omya	2,0%	184,9
Filler Recupero	0,0%	0,0
	100%	9700

Tabella 11: ricetta primi due impasti

Binder		
Mix		
%bit	4,9%	<b>475,3</b>
Pezzatura	% risp. Aggregati	m [g]
Sabbia 0/6	39,0%	3597,6
Graniglia 4/8	19,0%	1752,7
Pietrisco 8/12	8,0%	738,0
Pietrisco 12/25	32,0%	2951,9
Matrix	0,0%	0,0
Filler Omya	2,0%	184,5
Filler Recupero	0,0%	0,0
	100%	9700

Tabella 12: ricetta terzo e quarto impasto

Serie e setacci UNI EN	Passante totale % in peso			
	STRATO DI BASE	STRATO DI COLLEGAMENTO	STRATO DI USURA TIPO "A"	STRATO DI USURA TIPO "B"
31,5	100			
20	70 – 95	100		
16			100	
12,5	45 – 70	65 - 85	90 - 100	100
8	35 – 60	55 - 75	70 - 90	70 - 90
4	25 – 50	35 - 55	40 - 55	40 - 60
2	18 – 38	25 - 38	25 - 38	25 - 38
0,5	6 – 20	10 - 20	11 - 20	11 - 20
0,25	4 – 14	5 - 15	8 - 15	8 - 15
0,063	4 – 8	4 - 8	6 - 10	6 - 10
<b>Contenuto Bitume (%)</b>	<b>4.0 – 5.5</b>	<b>4.3 – 5.8</b>	<b>4.8 – 6.0</b>	<b>5.0 – 6.5</b>

Figura 73: limiti max e min dei differenti strati con percentuali bitume



### 3.2 ANALISI VOLUMETRICA

Prendendo in considerazione le formule per determinare la massa volumica apparente e il volume dei vuoti indicate nel sottocapitolo 2.3, si possono analizzare i valori delle 4 miscele ottenute con i vari tipi di bitume modificato:

#### A. Miscela A [bitume 70/100 additivato con SBS (60%) e compound (40%)]

Dove i parametri fissi per tutti i provini sono:

D [mm]	100
%bitume	4,7%
%aggregati	95,3%
$\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,02
$\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,68
$\rho_{max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,490
TH20	18,5
$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9987

Tabella 13: valori uguali per tutti i provini

- Metodo geometrico:

$$\rho_{b,geom} = \frac{m_1}{h \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^6$$

$$V_{m,geom} = \frac{\rho_m - \rho_{b,geom}}{\rho_m} \cdot 100$$

N° provino	hm [mm]	m1 [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$V_{m,geom}$
1	64,6	1151,5	2,271	8,8
2	64,425	1151,1	2,276	8,6
3	64,475	1147,9	2,268	8,9
4	65,2	1153,6	2,254	9,5
5	64,8125	1151,3	2,263	9,1
6	65,325	1159,8	2,262	9,2
7	64,3875	1149,7	2,275	8,6
8	65,5	1159,8	2,256	9,4
9	64,575	1139,3	2,248	9,7
10	65,475	1160,3	2,257	9,3
11	65,25	1153,5	2,252	9,5
12	64,85	1144	2,247	9,7
13	65,8875	1161,6	2,246	9,8
14	65,55	1146,6	2,228	10,5
15	65,55	1166	2,266	9,0
16	65,75	1157	2,242	10,0

Tabella 14: valori volume vuoti metodo geometrico prima miscela

- Metodo dry:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_w$$

$$V_{m,dry} = \frac{\rho_m - \rho_{bdry}}{\rho_m} \cdot 100$$

N° provino	m1[g]	m2 [g]	pb,dry [g/cm3]	Vm,dry
1	1151,5	667,6	2,377	4,5
2	1151,1	666,5	2,372	4,7
3	1147,9	668,1	2,389	4,0
4	1153,6	657,9	2,324	6,6
5	1151,3	658	2,331	6,4
6	1159,8	663,6	2,334	6,2
7	1149,7	660,3	2,346	5,8
8	1159,8	661,9	2,326	6,6
9	1139,3	661,6	2,382	4,3
10	1160,3	660,7	2,319	6,8
11	1153,5	671,5	2,390	4,0
12	1144	655,3	2,338	6,1
13	1161,6	663,1	2,327	6,5
14	1146,6	654,6	2,327	6,5
15	1166	672,1	2,358	5,3
16	1157	658,7	2,319	6,9

Tabella 15: valori volume vuoti metodo dry prima miscela

In rosso sono evidenziati i valori al di fuori del range del capitolato.

**B. Miscela B** [bitume 70/100 additivato con SBS (80%) e compound (20%)]

Dove i parametri fissi per tutti i provini sono:

D [mm]	100
%bitume	4,7%
%aggregati	95,3%
$\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,02
$\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,68
$\rho_{max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,490
TH20	18,7
$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9981

Tabella 16: valori uguali per tutti i provini

- Metodo geometrico:

N° provino	hm [mm]	m1 [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Vm,geom
1	65,1125	1145,9	2,242	9,9
2	65,225	1153,8	2,253	9,5
3	64,6125	1145	2,257	9,3
4	65,05	1166,8	2,285	8,2
5	64,125	1140,6	2,266	9,0
6	63,7125	1137,8	2,275	8,6
7	66,5875	1182,1	2,261	9,2
8	66,0125	1155,8	2,230	10,4
9	64,7125	1149,2	2,262	9,1
10	65,35	1164,5	2,270	8,8
11	64,375	1140,4	2,257	9,4
12	64,975	1165,3	2,285	8,2
13	64,55	1142,7	2,255	9,4
14	65,7875	1164,3	2,255	9,4
15	64,7	1138,6	2,242	10,0
16	65,4875	1163,7	2,264	9,1

Tabella 17: valori volume vuoti metodo geometrico seconda miscela

- Metodo dry:

N° provino	m1 [g]	m2 [g]	$\rho_{b,dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Vm,dry
1	1145,9	659,7	2,352	5,5
2	1153,8	670	2,380	4,4
3	1145	651,9	2,318	6,9
4	1166,8	671	2,349	5,7
5	1140,6	647,3	2,308	7,3
6	1137,8	654,4	2,349	5,6
7	1182,1	672,3	2,314	7,0
8	1155,8	657,7	2,316	7,0
9	1149,2	658,2	2,336	6,2
10	1164,5	674	2,370	4,8
11	1140,4	653,7	2,339	6,1
12	1165,3	669,3	2,345	5,8
13	1142,7	651,4	2,321	6,8
14	1164,3	665,4	2,329	6,4
15	1138,6	648,9	2,321	6,8
16	1163,7	661,2	2,311	7,2

Tabella 18: valori volume vuoti metodo dry seconda miscela

In rosso sono evidenziati i valori al di fuori del range del capitolato.

### C. Miscela C [bitume 70/100 additivato con SBS (100%)]

Dove i parametri fissi per tutti i provini sono:

D [mm]	100
%bitume	4,9%
%aggregati	95,1%
$\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,02
$\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,68
$\rho_{max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,482
TH20	20,4
$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9987

Tabella 19: valori uguali per tutti i provini

- Metodo geometrico:

N° provino	hm [mm]	m1 [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m,geom</sub>
1	62,40	1100,2	2,246	9,5
2	62,15	1071,5	2,196	11,5
3	60,93	1069	2,235	9,9
4	61,25	1098,8	2,285	7,9
5	65,10	1151,7	2,254	9,2
6	60,48	1069,6	2,253	9,2
7	62,63	1090,2	2,218	10,7
8	62,33	1086,7	2,221	10,5
9	59,53	1085,2	2,322	6,4
10	59,28	1093,2	2,349	5,3
11	60,68	1093,8	2,503	7,5
12	61,05	1121,7	2,341	5,7
13	60,65	1095,7	2,301	7,3
14	60,80	1083,9	2,271	8,5
15	61,00	1082,1	2,260	9,0
16	60,08	1092,1	2,316	6,7

Tabella 20: valori volume vuoti metodo geometrico terza miscela

- Metodo dry:

N° provino	m1 [g]	m2 [g]	$\rho_{b,dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m,dry</sub>
1	1100,2	627,6	2,325	6,3
2	1071,5	620,3	2,372	4,4
3	1069	610	2,326	6,3
4	1098,8	629,6	2,339	5,8
5	1151,7	656,3	2,322	6,5
6	1069,6	607,8	2,313	6,8
7	1090,2	616	2,296	7,5
8	1086,7	621,2	2,331	6,1
9	1085,2	625,6	2,358	5,0
10	1093,2	637,4	2,395	3,5
11	1093,8	632,8	2,370	4,5
12	1121,7	649,2	2,371	4,5
13	1095,7	631,7	2,358	5,0
14	1083,9	630,2	2,386	3,9
15	1082,1	623,3	2,355	5,1
16	1092,1	636,8	2,396	3,5

Tabella 21: valori volume vuoti metodo dry terza miscela

In rosso sono evidenziati i valori al di fuori del range del capitolato.

**D. Miscela D** [bitume 70/100 additivato con compound (100%)]

Dove i parametri fissi per tutti i provini sono:

D [mm]	100
%bitume	4,9%
%aggregati	95,1%
$\rho_b$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,02
$\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,68
$\rho_{max}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,482
TH20	20,2
$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9985

Tabella 22: valori uguali per tutti i provini

- Metodo geometrico:

N° provino	hm [mm]	m1[g]	pb,geom [g/cm3]	Vm,geom
1	61,675	1077,1	2,225	10,4
2	59,9	1060,5	2,255	9,1
3	61,65	1077,4	2,226	10,3
4	61,175	1085,8	2,261	8,9
5	62,275	1087,2	2,224	10,4
6	61,3	1075	2,234	10,0
7	62,275	1086,3	2,222	10,5
8	61,675	1079,5	2,230	10,2
9	60,825	1085,3	2,273	8,4
10	59,65	1081,8	2,310	6,9
11	61,225	1085,8	2,259	9,0
12	60,125	1087,4	2,304	7,2
13	60,3	1071,4	2,263	8,8
14	60,425	1098,8	2,317	6,7
15	60,9	1068,7	2,235	9,9
16	59,775	1077,7	2,297	7,5

Tabella 23: valori volume vuoti metodo geometrico quarta miscela



- Metodo dry:

N° provino	m1[g]	m2[g]	$\rho_{b,dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	V <sub>m,dry</sub>
1	1077,1	612	2,311	6,9
2	1060,5	606,8	2,333	6,0
3	1077,4	614,5	2,323	6,4
4	1085,8	622,1	2,337	5,8
5	1087,2	617,1	2,308	7,0
6	1075	609,8	2,306	7,1
7	1086,3	615,8	2,304	7,2
8	1079,5	615	2,320	6,5
9	1085,3	625,4	2,355	5,1
10	1081,8	626,5	2,372	4,5
11	1085,8	617,6	2,315	6,7
12	1087,4	630,8	2,377	4,2
13	1071,4	614	2,338	5,8
14	1098,8	638,2	2,381	4,1
15	1068,7	614	2,346	5,5
16	1077,7	621,7	2,359	5,0

Tabella 24: valori volume vuoti metodo dry quarta miscela

In rosso sono evidenziati i valori al di fuori del range del capitolato.

### 3.3 CONFRONTO DELLE ANALISI VOLUMETRICHE

Dati alla mano, possiamo analizzare i risultati volumetrici ottenuti sulle 4 miscele. Di seguito vengono confrontati i valori:

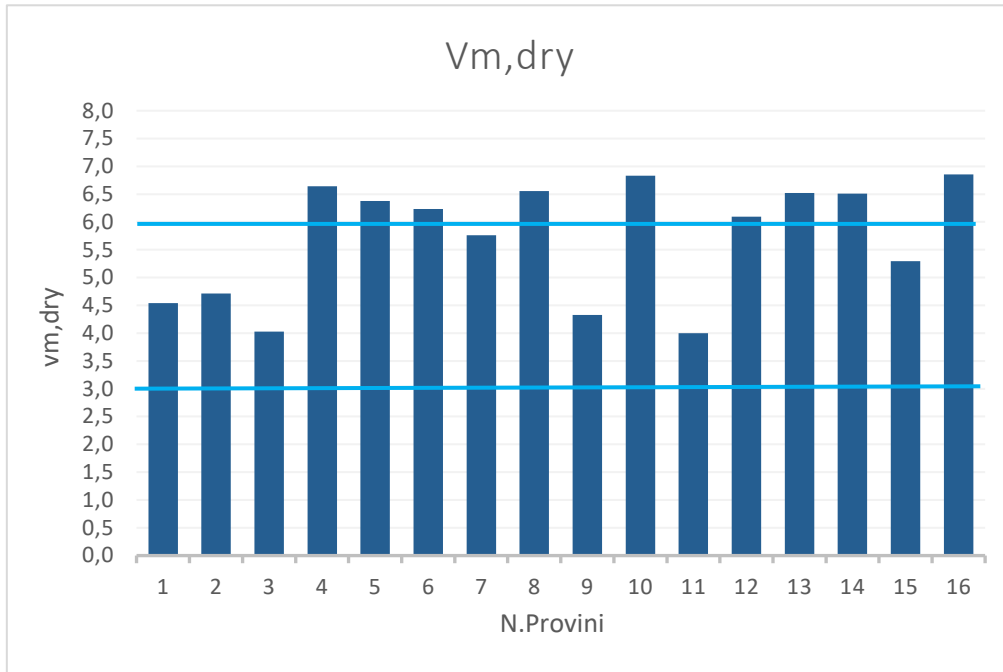


Figura 74: valori relativi al volume dei vuoti metodo dry miscela A

Come si può notare dal grafico, nella prima miscela, utilizzando un bitume 70/100 additivato con SBS (60%) e compound (40%), non tutti i provini hanno una percentuale di vuoti che rientra all'interno del range 3-6% del capitolato ANAS. Prendendo in considerazione un margine di errore di 0,3, i provini esclusi da questo range sono: N° 4,5,8,10,13,14 e 16, per i quali la percentuale di vuoti residui risultano maggiori del 3%.

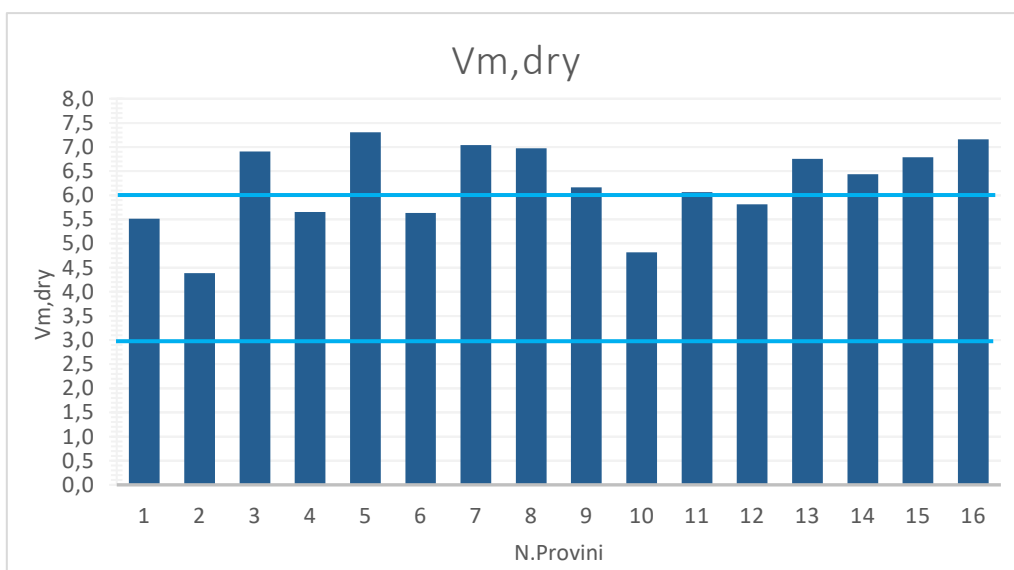


Figura 75: valori relativi al volume dei vuoti metodo dry miscela B

Si può notare invece, dal grafico precedente, che nella seconda miscela, utilizzando un bitume 70/100 additivato con SBS (80%) e compound (20%), non tutti i provini hanno una percentuale di vuoti che rientra all'interno del range del capitolato ANAS. Considerando lo stesso margine di errore della prima miscela, i provini esclusi da questo range sono: N°.3,5,7,8,13,14,15 e 16 per i quali la percentuale di vuoti residui risultano maggiore del 3%.

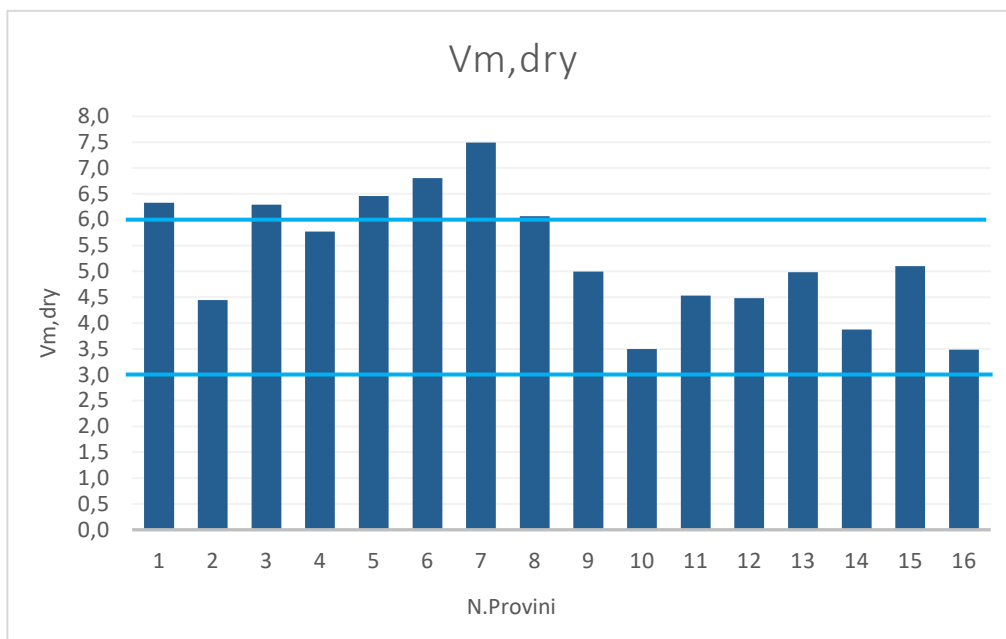


Figura 76: valori relativi al volume dei vuoti metodo dry miscela C

Nella terza miscela invece, utilizzando il bitume 70/100 additivato con SBS (100%), in termini di percentuale di vuoti, si hanno solo tre provini all'infuori del range previsto dall'ANAS e sono: N°5,6 e 7 per i quali la percentuale di vuoti residui risultano maggiore del 3%. Questa miscela, tra le quattro analizzate, ha la minor quantità di provini eliminati.

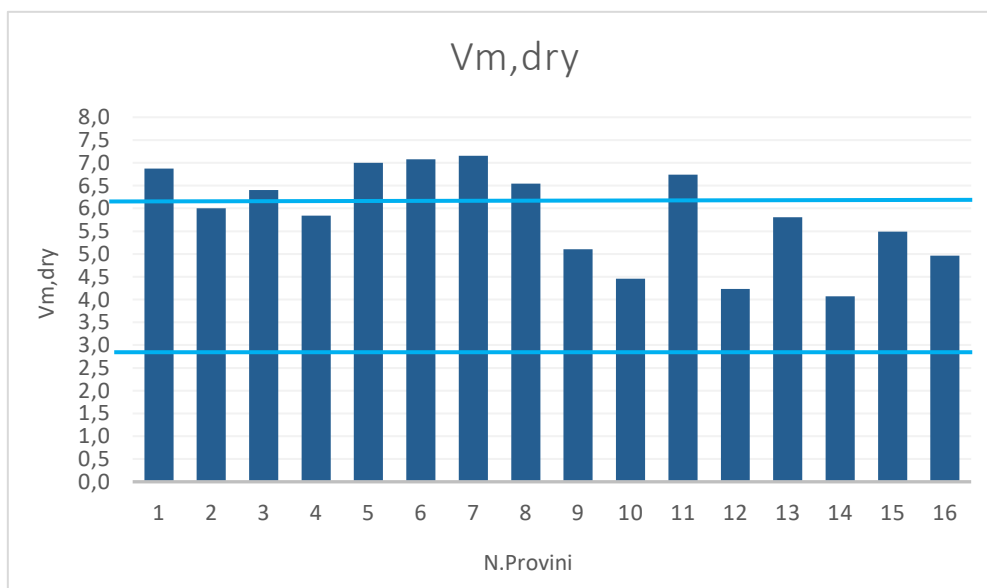


Figura 77: valori relativi al volume dei vuoti metodo dry miscela D

Infine, da come si evince dal precedente grafico, nell'ultima miscela composta dal bitume 70/100 additivato con compound (100%), non tutti i provini hanno una percentuale di vuoti che rientra all'interno del range 3-6% del capitolato ANAS. I provini esclusi da questo range quindi sono: N°.1,3,5,6,7,8,11 per i quali la percentuale di vuoti residui risultano maggiore del 3%.

Prendendo solamente in considerazione i valori che rientrano all'interno del capitolato, le miscele messe a confronto, hanno un valore medio costante di percentuale di vuoti tra i 4,9-5% (come raffigurato nel grafico sottostante). Andando però a vedere la quantità di campioni eliminati le miscele A,B e D, hanno un numero elevato (7), forse dato dal fatto che quel tipo di bitume è difficilmente compattabile, rendendo la miscela con molti vuoti.

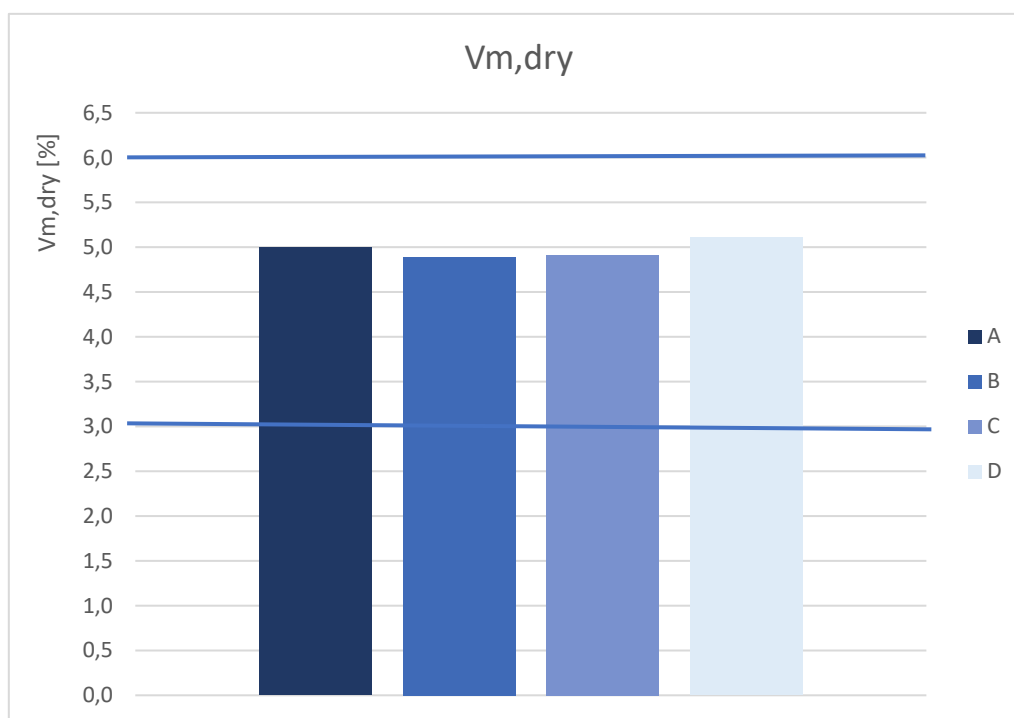


Figura 78: valori relativi al volume medio dei vuoti metodo dry di tutte le miscele dei soli provini rientranti nel range

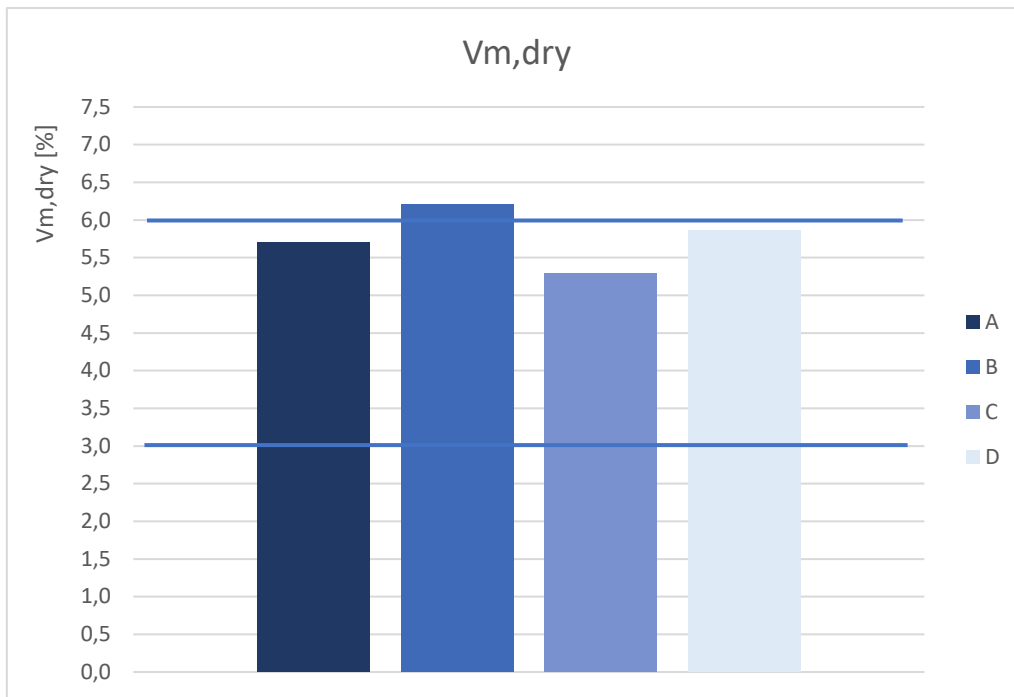


Figura 79: valori relativi al volume medio dei vuoti metodo dry di tutte le miscele

Come si può notare invece dal grafico contenente tutti i valori, per quasi tutte le miscele la percentuale di vuoti rientra nei limiti del range previsto dal Capitolato ANAS (3-6 %), con qualche leggera eccezione; la miscela B è quello con la percentuale di vuoti residui più alta (6,2 %) ma considerando un margine di errore di + o - 0,3% si possono comunque considerare all'interno del range. Si deve far notare tuttavia, come tutte le miscele sono al limite superiore del range.

### 3.4 ANALISI DELLA PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA E MODULI DI RIGIDEZZA (ITS E ITSM)

In questo capitolo, vengono esposti i risultati delle prove a trazione indiretta con rispettivi moduli condotte in laboratorio. Codeste prove hanno comportato l'uso di soli 4 provini scelti in modo casuale. Si riprendono in considerazione i parametri fissi indicati nel capitolo 3.2 per la realizzazione delle miscele.

#### A. Miscela A [bitume 70/100 additivato con SBS (60%) e compound (40%)]

Prendendo in considerazione le formule relative al sottocapitolo 2.4:

$$ITSM = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,273 + \nu) \qquad ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d}$$

N° provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]	$\sigma_{x,max}$ [kN]	d/dc	ITS [Mpa]
3	6961	6581	6771	11,22	0,02262727	1,11
4	6242	6328	6285	10,08	0,024927	0,98
11	7821	7796	7808,5	10,04	0,032244	0,98
12	5762	5573	5667,5	9,36	0,025205	0,92
			6955			0,9975

Tabella 25: valori ITSM e ITS ottenuti dalle misure effettuate in laboratorio

Dove, ITSM1 si riferisce alla prima diagonale mentre ITSM2 si riferisce alla seconda diagonale, ovvero andando a girare il provino di 90°.

#### B. Miscela B [bitume 70/100 additivato con SBS (80%) e compound (20%)]

N° provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]	$\sigma_{x,max}$ [kN]	d/dc	ITS [Mpa]
3	4954	5179	5066,5	8,94	0,028335645	0,88
4	6345	5660	6002,5	11,05	0,029556	1,08
11	5052	4419	4735,5	8,04	0,025753	0,79
12	4868	5191	5029,5	8,875	0,03444678	0,87
			5208,5			0,905

Tabella 26: valori ITSM e ITS ottenuti dalle misure effettuate in laboratorio

**C. Miscela C** [bitume 70/100 additivato con SBS (100%)]

Su questa miscela, sono state effettuate le prove di modulo (solo nel pima diagoale) su tutti i provini per avere una classificazione, prima della la realizzazione delle prove di fatica, del tipo di campione così da poterlo analizzare.

N° provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]	$\sigma_{x,max}$ [kN]	d/dc	ITS [Mpa]
2	3945	-	3945	-	-	-
3	3625	3380	3502,5	7,9	0,02565	0,825
4	4797	4543	4670	8,6	0,03126	0,895
5	4452	-	4452	-	-	-
6	4735	-	4735	-	-	-
7	4466	-	4466	-	-	-
8	5149	-	5149	-	-	-
9	5308	-	5308	-	-	-
10	6475	-	6475	-	-	-
11	6419	6121	6270	10,28	0,03	1,08
12	6238	6754	6496	10,275	0,03867	1,08
13	5730	-	5730	-	-	-
14	6622	-	6622	-	-	-
15	5334	-	5334	-	-	-
16	6477	-	6477	-	-	-
			5680			0,97

Tabella 27: valori ITSM e ITS ottenuti dalle misure effettuate in laboratorio



D. **Miscela D** [bitume 70/100 additivato con compound (100%)]

Anche in questa miscela, come nella C, si procede con la determinazione dei moduli sempre su una sola diagonale di ogni provino.

N° provino	ITSM1 [Mpa]	ITSM2 [Mpa]	ITSMm [Mpa]	$\sigma_{x,max}$ [kN]	d/dc	ITS [Mpa]
1	4233	-	4233	-	-	-
2	5105	-	5105	-	-	-
3	4907	-	4907	-	-	-
4	4550	-	4550	-	-	-
5	4818	-	4818	-	-	-
6	5048	5294	5171	8,35	0,01774	0,868
7	4512	4383	4447,5	7,74	0,02443	0,7925
8	5431	-	5431	-	-	-
9	4500	-	4500	-	-	-
10	5389	-	4389	-	-	-
11	5012	5218	5115	8,18	0,03088	0,95
12	5323	5139	5231	9,95	0,0228	1,05
13	5291	-	5291	-	-	-
14	6377	-	6377	-	-	-
15	5841	-	5841	-	-	-
16	6749	-	6749	-	-	-
			4991,125			0,91513

Tabella 28: valori ITSM e ITS ottenuti dalle misure effettuate in laboratorio

### 3.5 CONFRONTO RISULTATI ITSM E ITS

Andando a confrontare i valori ottenuti dalle prove di laboratorio, possiamo descriverli tramite dei grafici.

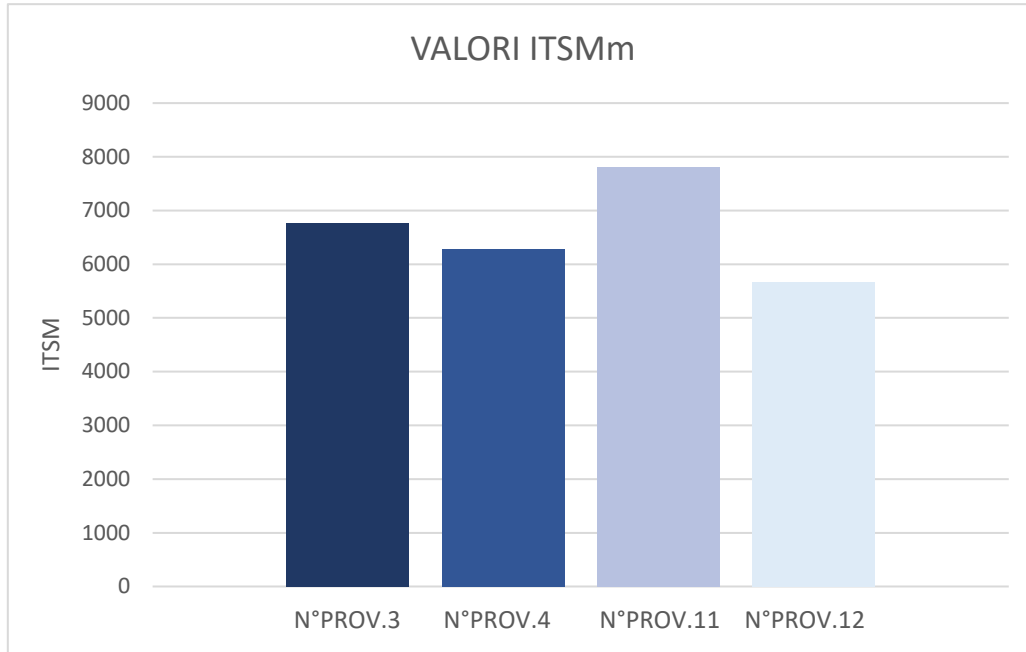


Figura 80: valori relativi all'ITSMm prima miscela

Come si può osservare dal grafico, si può notare che i valori dell'ITSMm della prima miscela hanno dei valori costanti, tranne che per il provino n°12, dato che il valore è leggermente più basso rispetto agli altri.

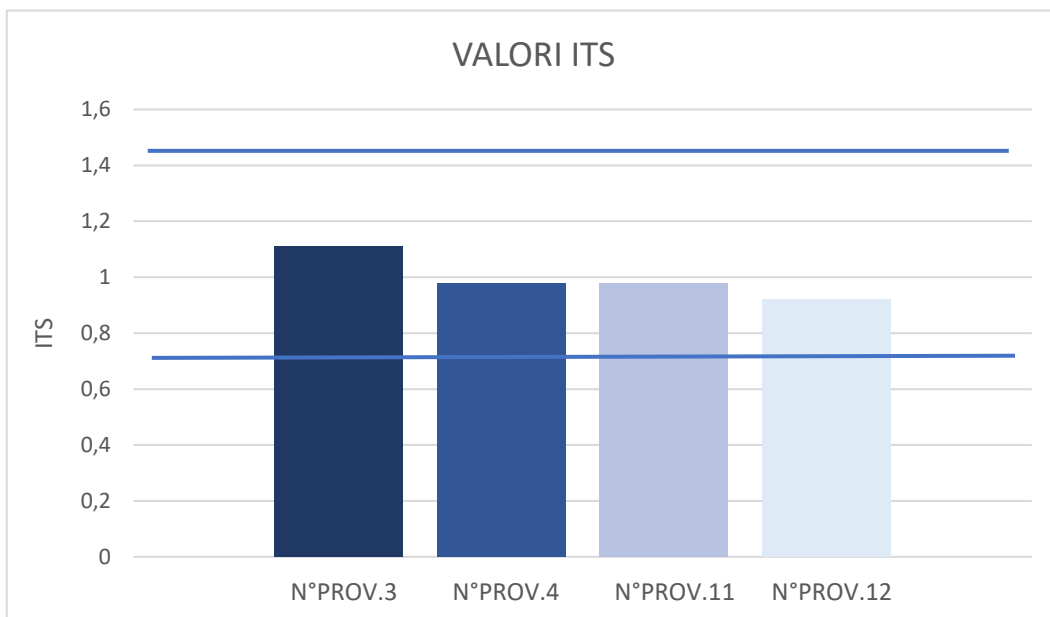


Figura 81: valori relativi all'ITS prima miscela

Dal grafico precedente contenete i 4 valori di ITS relativi alla prima miscela, si può notare che tutti questi rientrano all'interno dei limiti descritti dal capitolato ANAS.

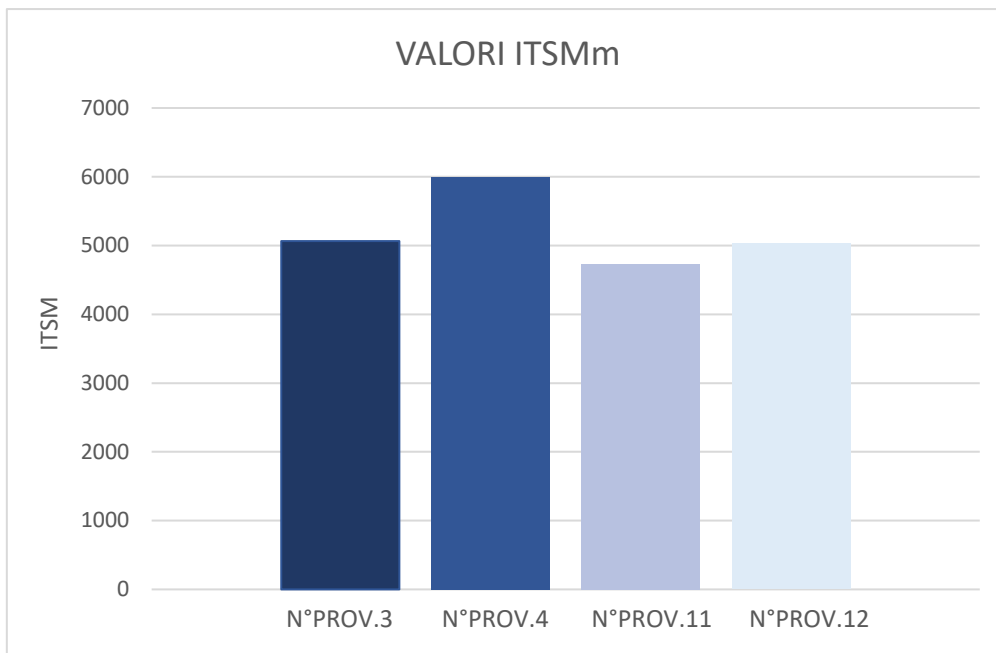


Figura 82: valori relativi all'ITSMm seconda miscela

In questa seconda miscela, si può notare che i valori dei moduli di trazione indiretta medi siano leggermente minori rispetto alla prima miscela. Il provino n°4 ha dei valori che si avvicinano alla prima miscela.

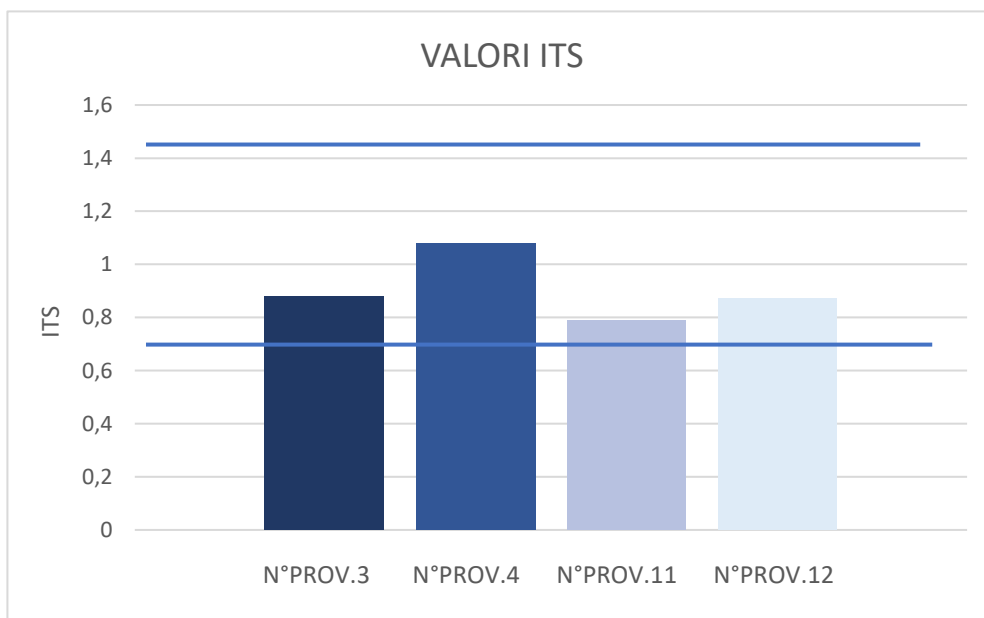


Figura 83: valori relativi all'ITS seconda miscela

Anche nella seconda miscela, da come si può osservare dal grafico precedente, tutti i valori dei provini analizzati rientrano nel range del capitolato.

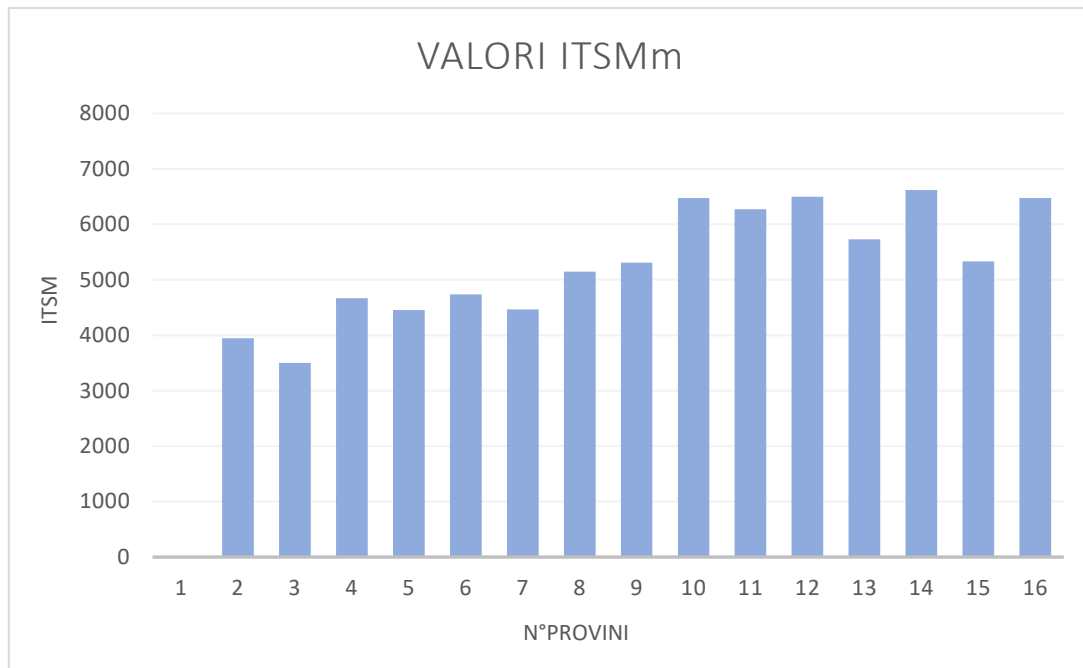


Figura 84: valori relativi all'ITSMm terza miscela

Osservando il comportamento della terza miscela, si può notare che i valori dell'ITSMm, non sono costanti ma crescono per il secondo impasto. In questo impasto sono stati misurati i moduli di trazione indiretta di tutti i provini, tranne il primo.

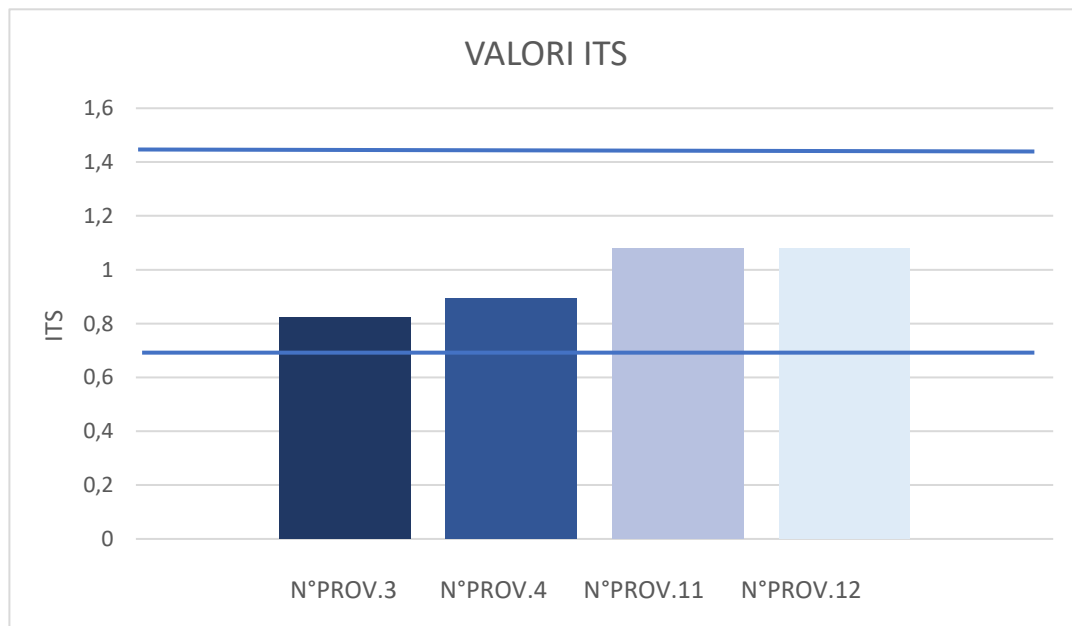


Figura 85: valori relativi all'ITS terza miscela

Facendo riferimento alla figura 85, si nota, come nelle precedenti miscele, che i risultati di ITS rientrano all'interno dell'intervallo 0,72-1,45.

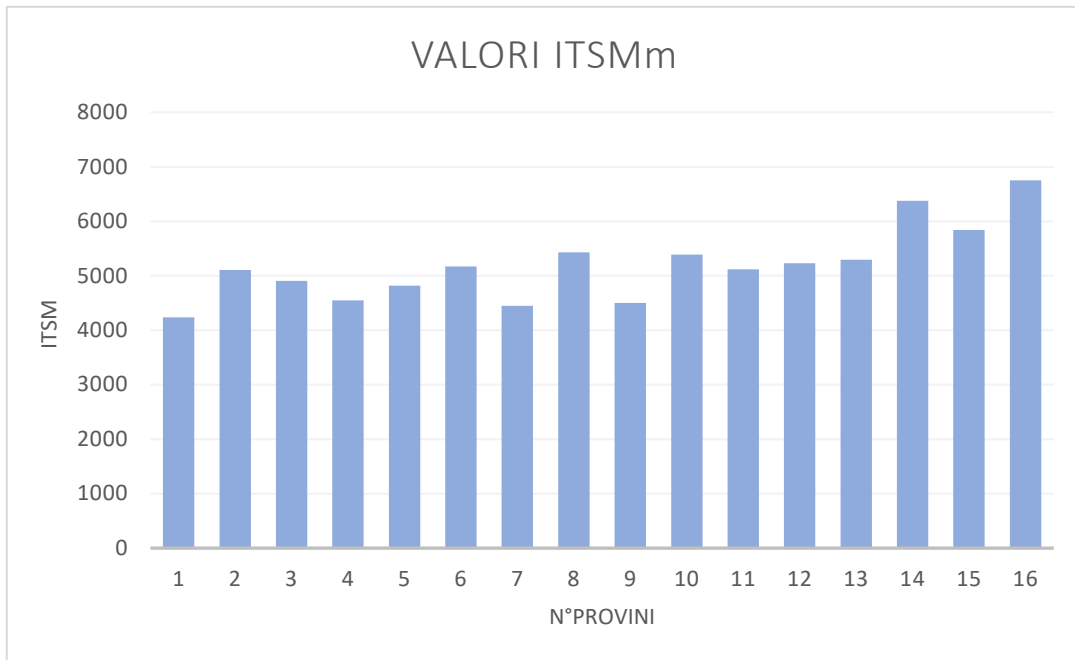


Figura 86: valori relativi al ITSMm quarta miscela

Come riportato in quest'ultimo grafico, osservando i valori ottenuti dalla prova, sono i più bassi rispetto alle altre miscele, dato probabilmente dal fatto che non ci siano SBS nel bitume utilizzato. Anche nell'ultima miscela però, si può notare che negli ultimi provini si hanno dei valori più alti.

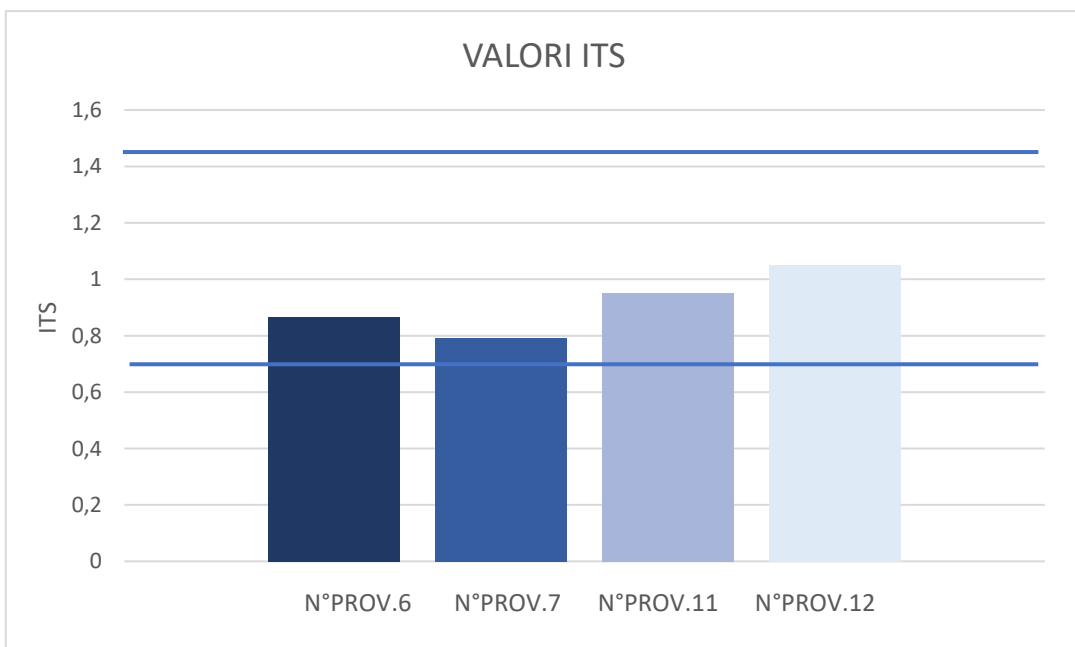


Figura 87: valori relativi al ITS quarta miscela

Come espresso nell'ultimo grafico si può vedere che, i valori di rottura ITS, sono all'interno del range del capitolato. Il valore del provino n°7, è il più basso ottenuto nella sperimentazione seguente.

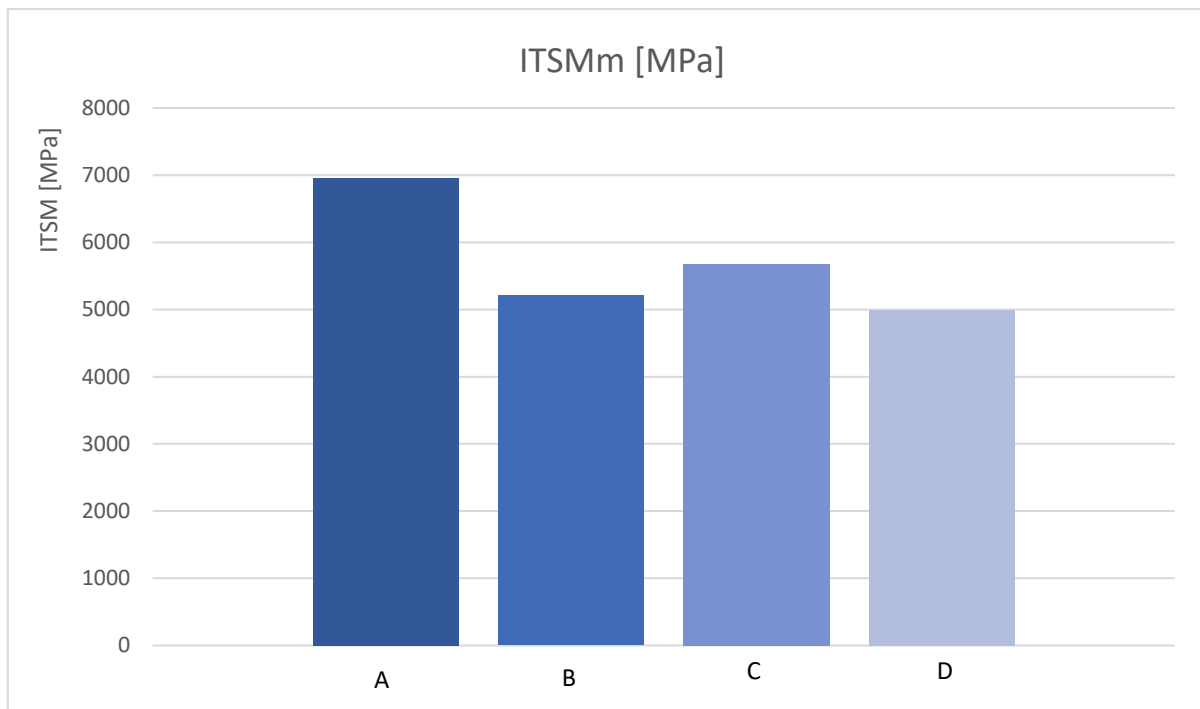


Figura 88: valori relativi al ITSM valori medi

Analizzando i valori medi del precedente grafico, si può notare che nella miscela contenente bitume 70/100 additivato con SBS e compound in rapporto 60/40 (A) ha i valori più alti, all'incirca uguali a 7000 Mpa; quindi sembra che:

- l'aggiunta di percentuali di 60% di SBS e 40% PFU al bitume comporta un conglomerato bituminoso più rigido rispetto alle altre miscele con differenti bitumi;
- la presenza invece di bitume 70/100 additivato comporta una miscela meno rigida.

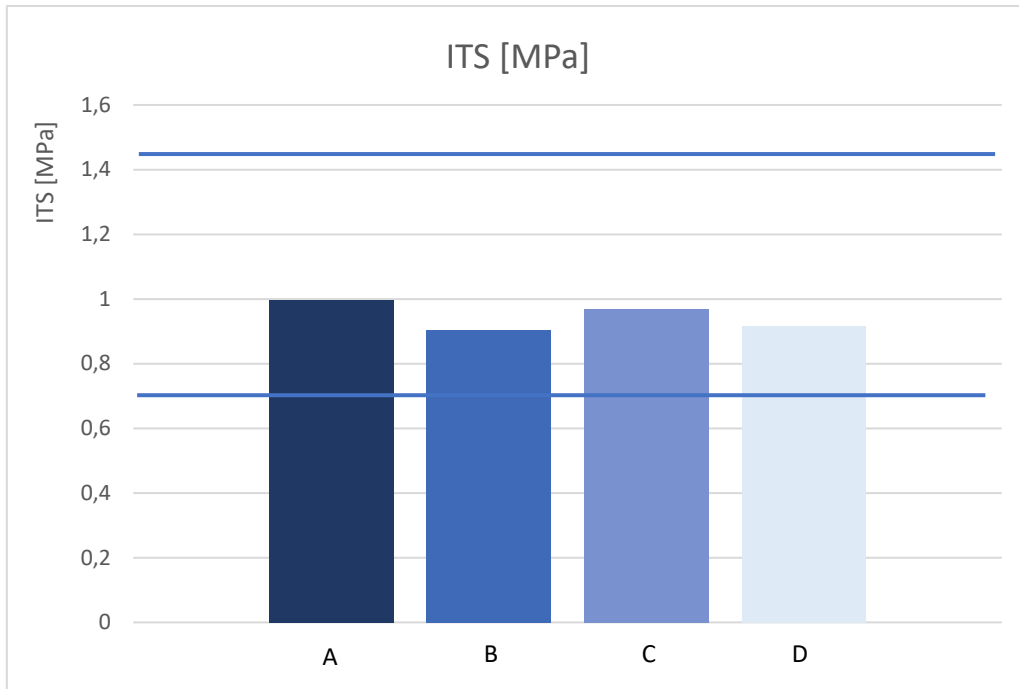


Figura 89: valori relativi al ITS valori medi

I valori della resistenza a trazione indiretta risultano compresi all'interno di quelli forniti dal capitolato ANAS, per tutte le miscela utilizzate nella sperimentazione. Tutti i conglomerati bituminosi mostrano una modalità di rottura molto simile.



### 3.6 ANALISI PROVA DI FATICA (ITF)

La metodologia d'analisi prevede, per quanto riguarda la prova ITF, la rappresentazione dell'iterazione dei punti ottenuti dai vari stadi di prova. Particolare attenzione alla deformazione accumulata nei primi cicli di carico, dipendente essenzialmente dalla distribuzione granulometrica all'interno del provino, dallo scheletro solido, dai vuoti interstiziali, e dallo stato di addensamento della miscela.

Analizzando la prima miscela abbiamo:

N° provino	$\sigma$ [kPa]	$\epsilon_i$	Ncicli	Tipo
2	450	380	16500	V
5	350	240	149700	I
6	250	143	833500	L
7	350	183	262500	I
13	250	153	729350	L
14	450	318	20646	V
15	350	201	149501	I
16	450	337	33358	V

Tabella 29: valori ottenuti dalle prove di fatica

Dove:

- Tipo sta ad indicare: L=lenta, V=veloce, I=intermedia.

Miscela B:

N° provino	$\sigma$ [kPa]	$\epsilon_i$	Ncicli	Tipo
2	250	177	239000	L
5	250	177	239000	L
6	450	540	11864	V
7	350	350	65000	I
8	350	365	56000	I
13	450	514	8805	V
14	450	524	10000	V
16	350	382	64500	I

Tabella 30: valori ottenuti dalle prove di fatica

Miscela C:

N° provino	$\sigma$ [kPa]	$\epsilon_i$	Ncicli	Tipo
2	275	255	157586	L
6	250	205	309186	L
8	250	171	736500	L
9	350	276	79706	I
10	450	351	33556	V
13	350	246	92686	I
14	450	337	37260	V
15	500	391	9500	V
16	350	245	74500	I

Tabella 31: valori ottenuti dalle prove di fatica

Miscela D:

N° provino	$\sigma$ [kPa]	$\epsilon_i$	Ncicli	Tipo
1	350	448	25500	V
2	300	254	77500	I
4	450	509	7966	V
8	300	217	140315	I
9	450	567	11000	V
10	250	178	829326	L
13	350	241	210145	L
15	200	105	2525000	L
16	250	175	525000	I

Tabella 32: valori ottenuti dalle prove di fatica

### 3.7 CONFRONTO RISULTATI PROVA ITF

In questo paragrafo possiamo andare ad osservare i valori ottenuti dalle prove su grafici opportuni e confrontarli tra di loro:

- Miscela A:

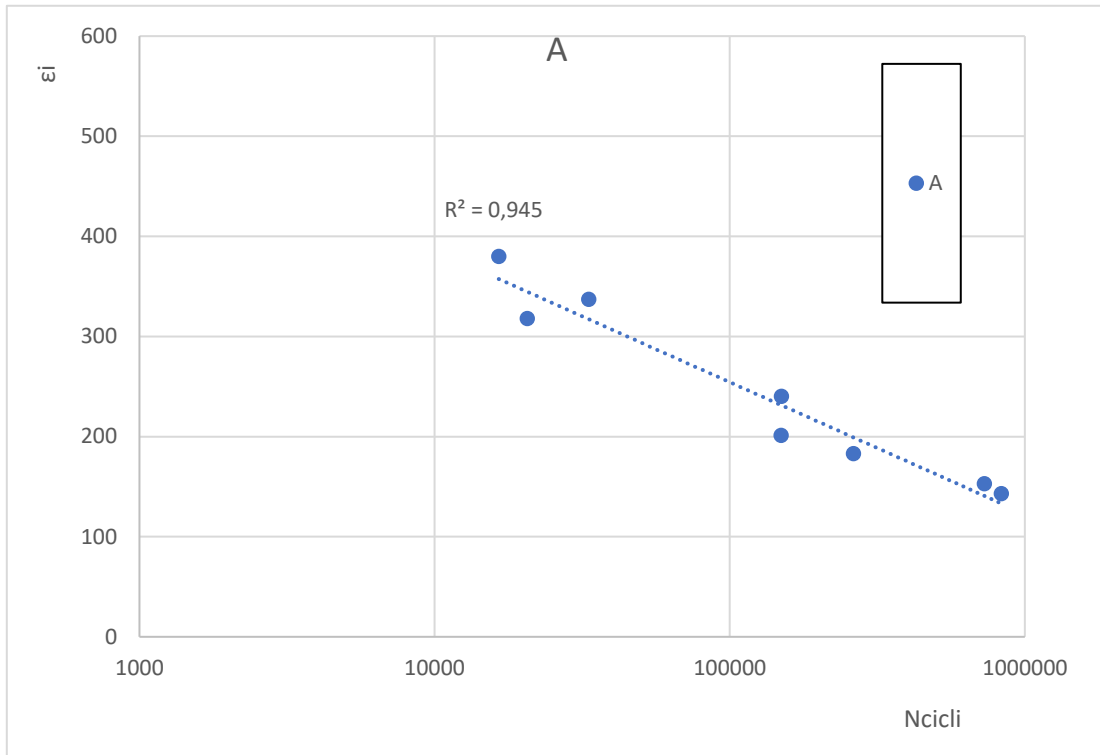


Figura 90: valori relativi alle deformazioni della prova ITF prima miscela

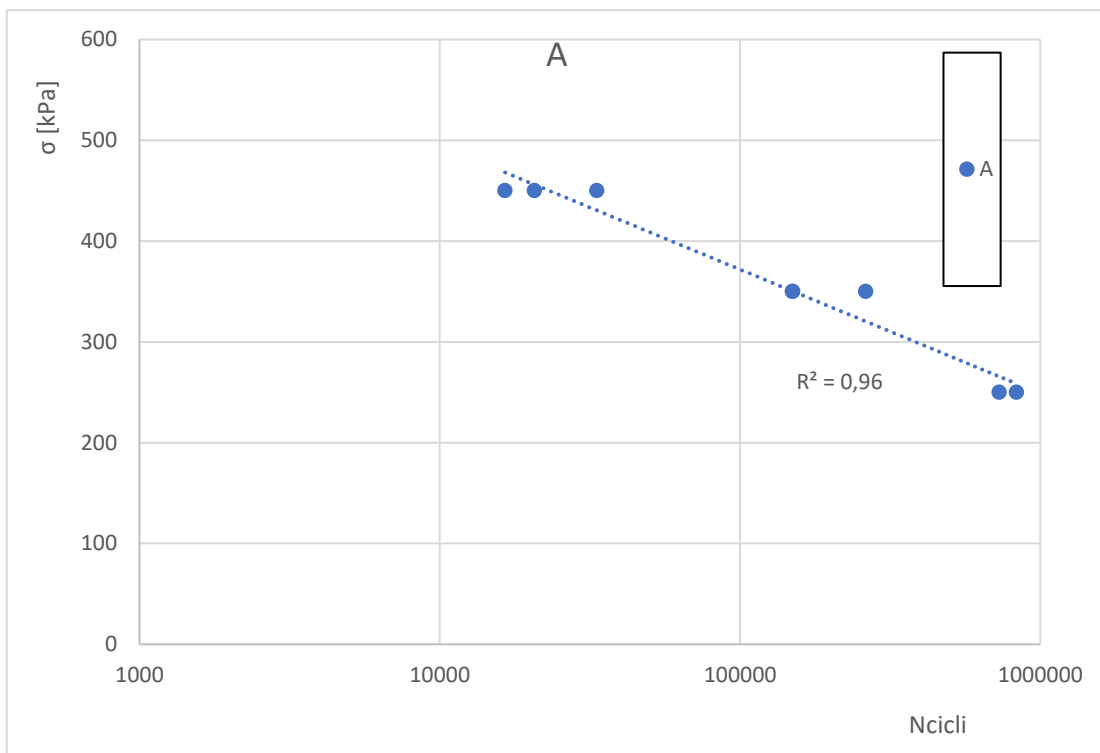


Figura 91: valori relativi alle tensioni fissate nella prova ITF prima miscela

- Miscela B:

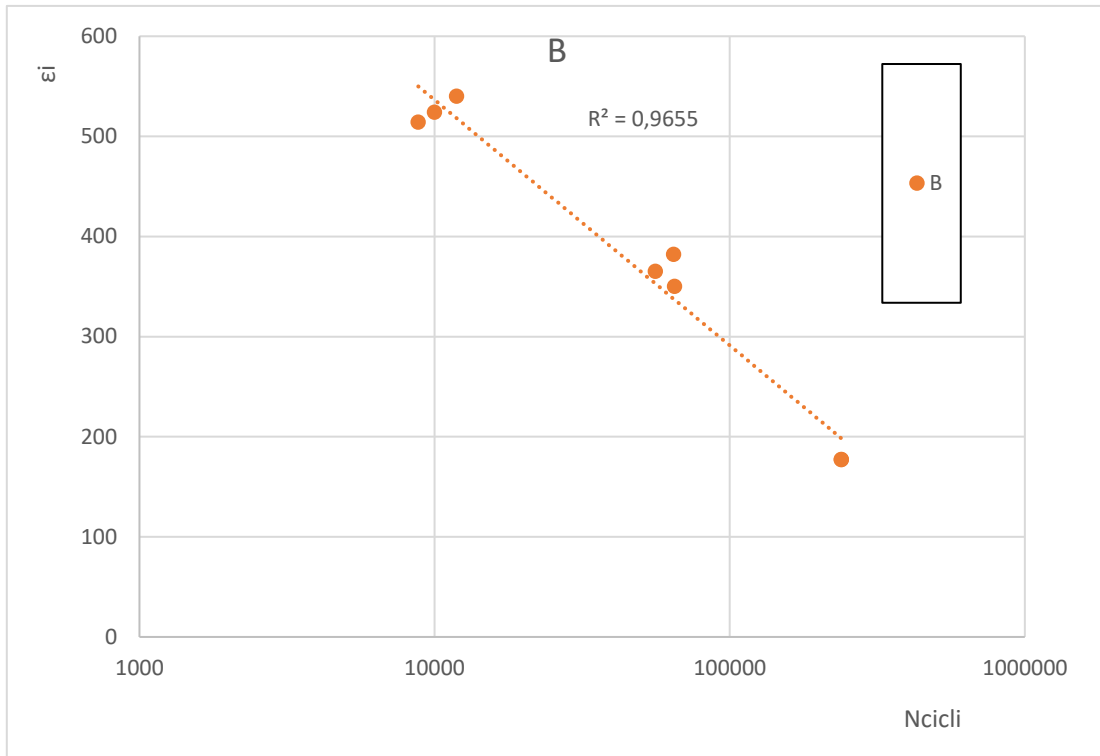


Figura 92: valori relativi alle deformazioni della prova ITF seconda miscela

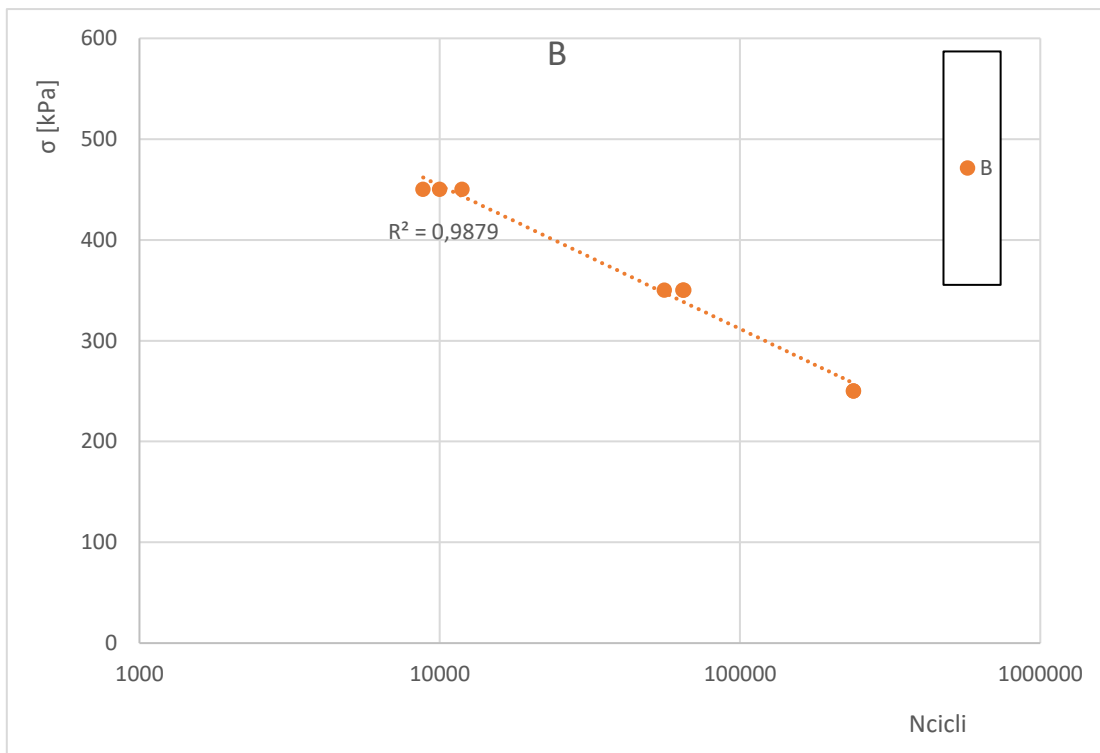


Figura 93: valori relativi alle tensioni fissate nella prova ITF seconda miscela

- Miscela C

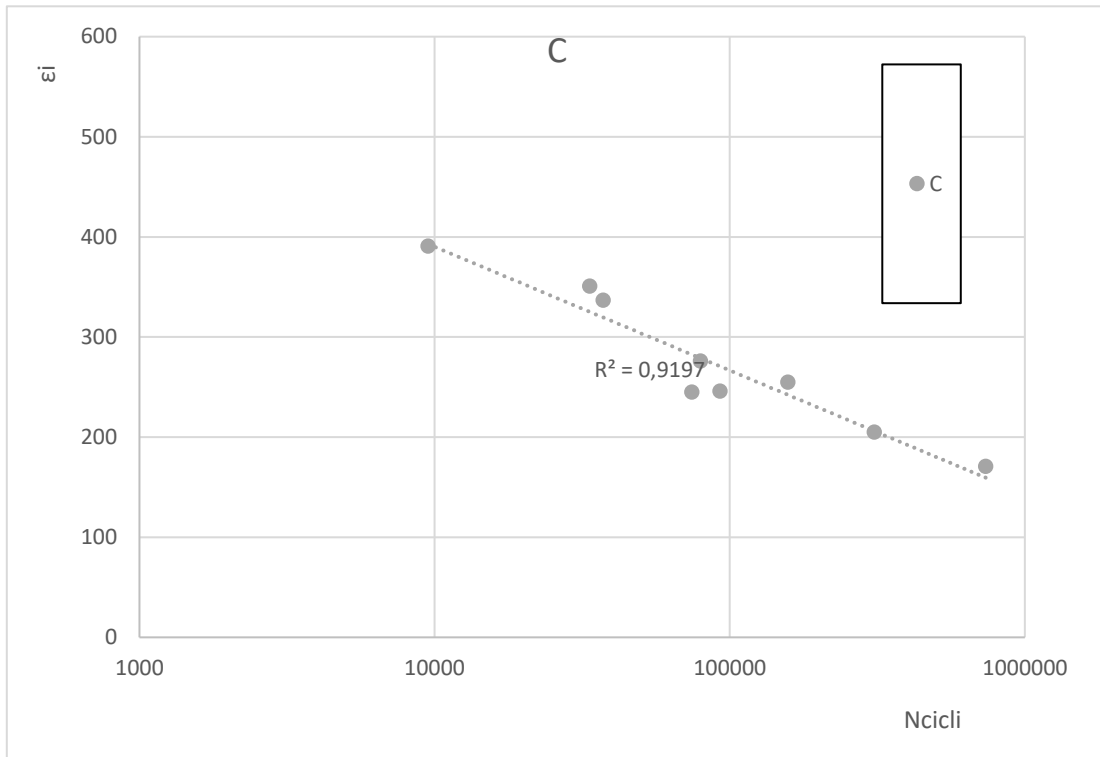


Figura 94: valori relativi alle deformazioni della prova ITF terza miscela

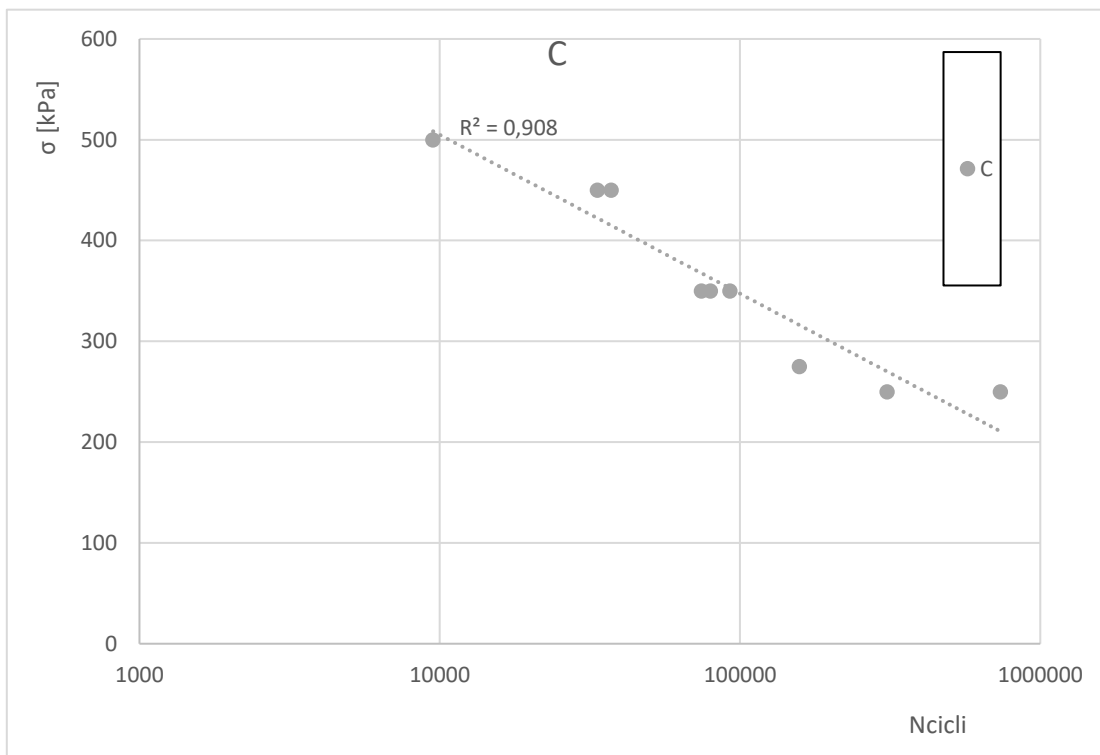


Figura 95: valori relativi alle tensioni fissate nella prova ITF terza miscela

- Miscela D:

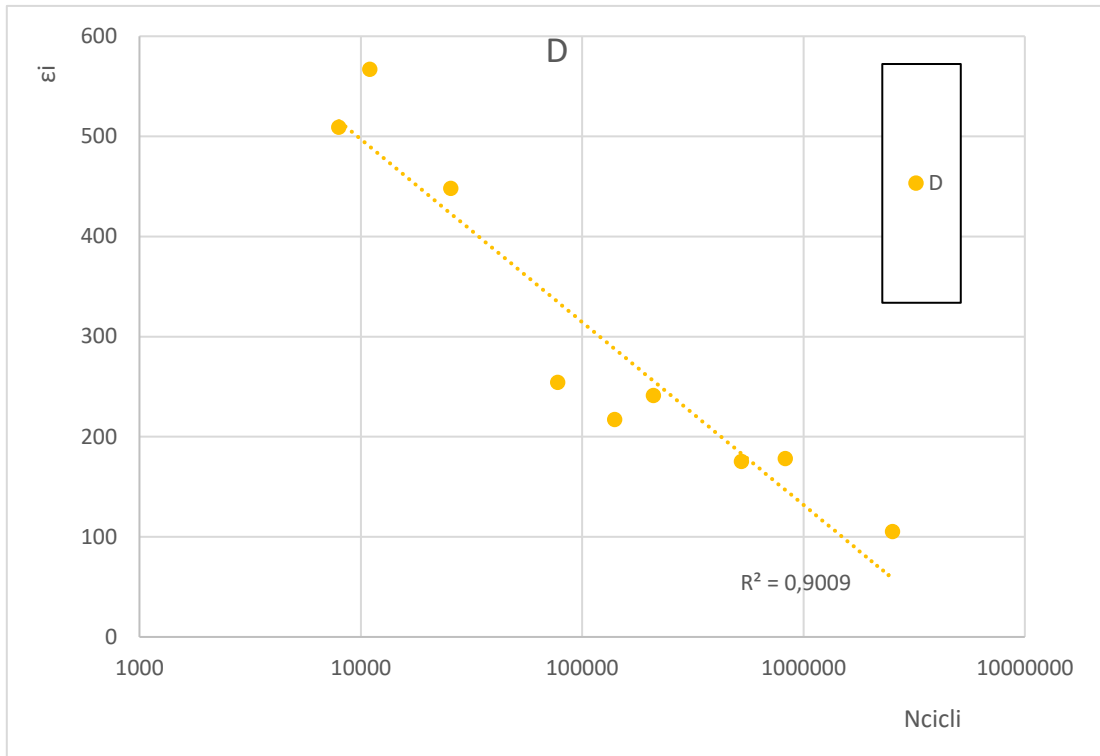


Figura 96: valori relativi alle deformazioni della prova ITF quarta miscela

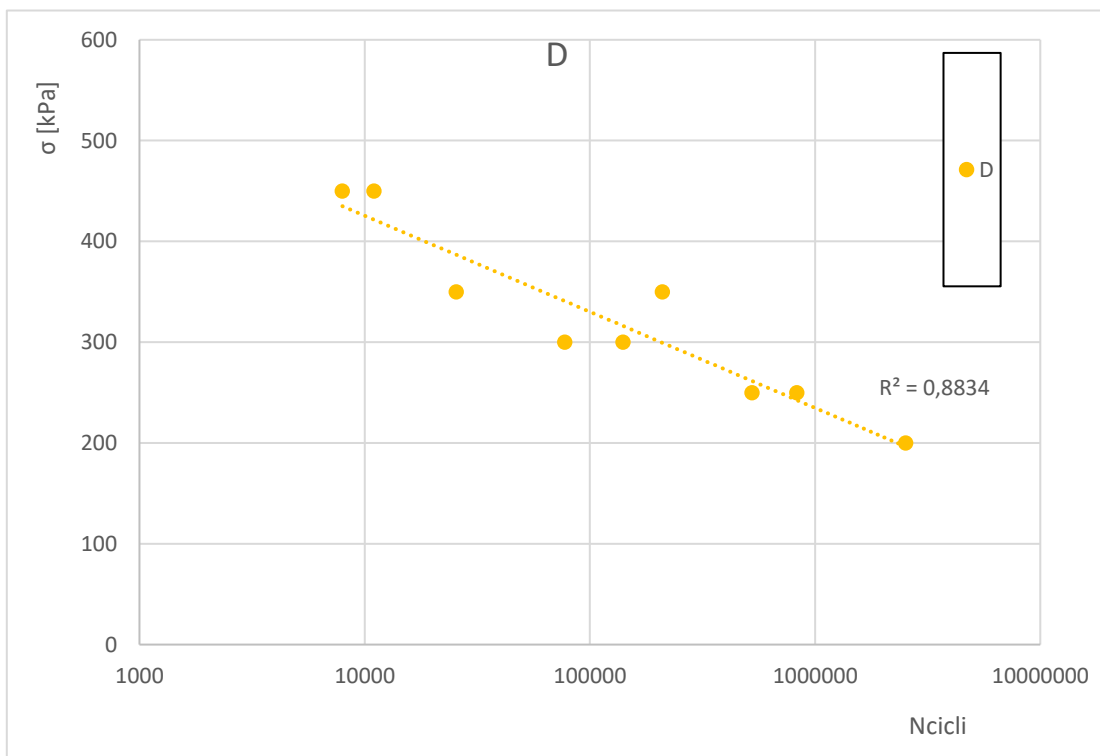


Figura 97: valori relativi alle tensioni fissate nella prova ITF quarta miscela

Ora si possono osservare, di seguito, i grafici riepilogativi:

- Deformazione  $\epsilon_i$ :

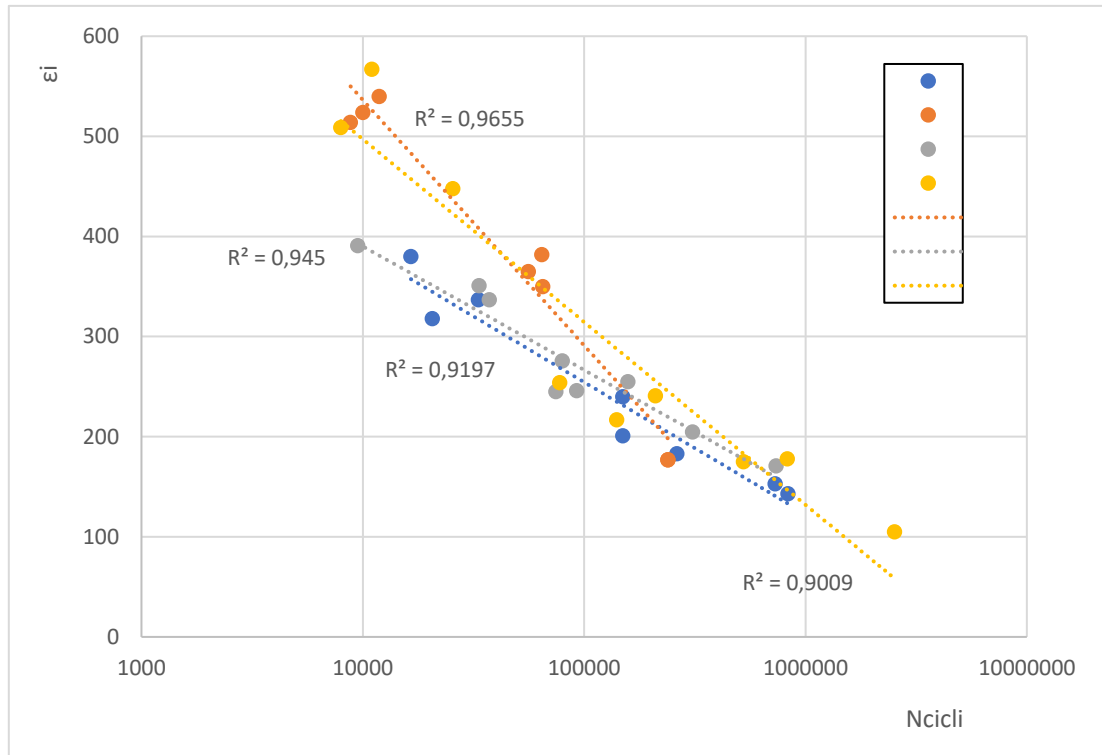


Figura 98: valori relativi alle deformazioni della prova ITF confronto delle miscele

Andando ad osservare il grafico delle deformazioni, contenente tutti i dati delle 4 miscele si possono notare che i valori tra di loro non si discostano di molto, ma le miscele A (sbs+compound in rapporto 60/40) e C (riferimento) hanno degli andamenti pressoché uguali a due a due la somiglianza delle miscele B (sbs+compound in rapporto 80/20) e D (solo compound). Analizzando quindi l'andamento dei numeri dei cicli in funzione della deformazione iniziale, le miscele B e D sembrerebbero comportarsi meglio a fatica rispetto alle altre.



- Tensione  $\sigma$  [kPa]:

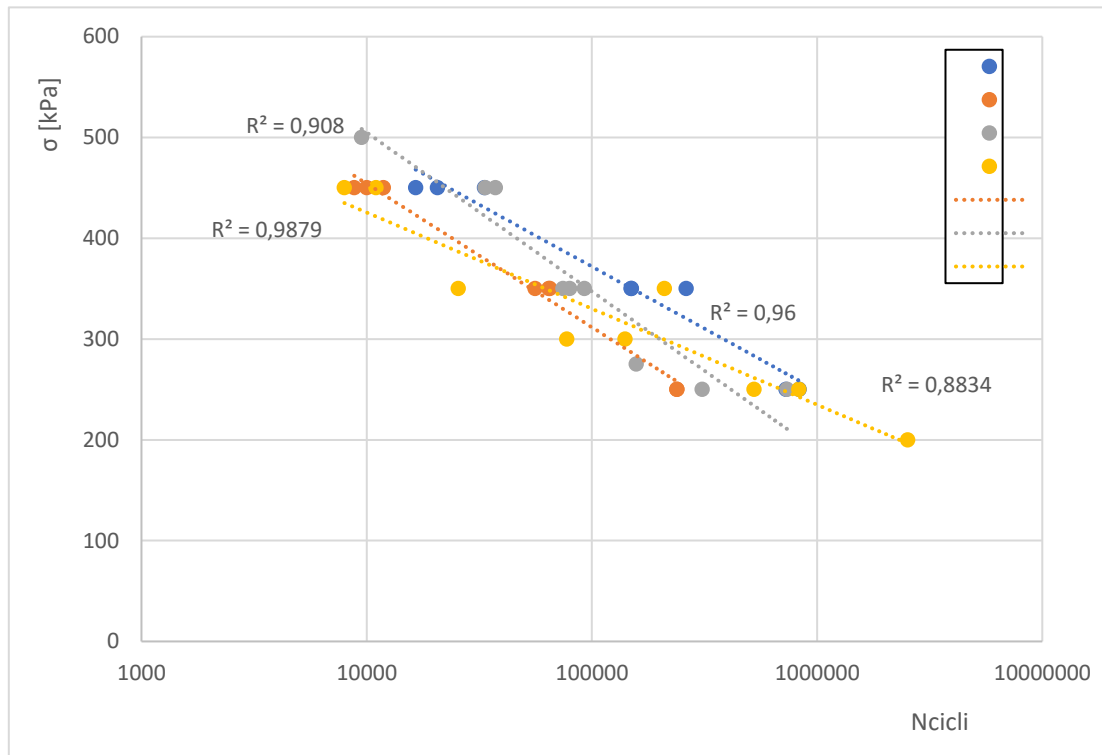


Figura 99: valori relativi alle tensioni fissate della prova ITF confronto delle miscele

Andando invece ad osservare l'andamento del numero dei cicli in funzione dello sforzo applicato, dal grafico precedente è chiaro come l'aggiunta delle diverse tipologie di modifica provoca, tra di loro, un cambiamento trascurabile delle caratteristiche prestazionali delle miscele. Il comportamento del conglomerato bituminoso a fatica infatti, risulta confrontabile per tutti i tipi di bitumi, dato che le miscele hanno tutte lo stesso quantitativo di aggregati con le rispettive pezzature.

Globalmente, analizzando entrambe le tipologie di grafico possiamo concludere che le miscele B (sbs+compound in rapporto 80/20) e D (solo compound). Ovviamente si tratta solo di un primo risultato, per poterlo affermare con certezza sono necessarie altre prove di laboratorio che sono tutt'ora in corso in laboratorio.

## **CONCLUSIONI**

La seguente sperimentazione condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura”, è stata finalizzata con l’obiettivo di studiare le caratteristiche meccaniche di quattro differenti famiglie di conglomerato bituminoso, due con bitume modificato contenente polimeri e polverino di gomma ottenuto da pneumatici fuori uso (con differenti percentuali di SBS e PFU l’una con l’altra), l’altra con bitume modificato con solo componenti polimerici e l’ultima con bitume modificato con solo compound, allo scopo di confrontarle fra loro.

I dati raccolti al termine della sperimentazione, ci permettono di comprendere le dinamiche relative al riciclo di PFU e nel dettaglio, le peculiarità che ci garantiscono di ottenere una migliore efficienza nell’utilizzo di additivi polimerici, riducendo il quantitativo delle materie prime.

Dall’analisi dei risultati di questa sperimentazione sono state dedotte le seguenti considerazioni:

- come si può notare dal grafico contenente tutti i valori riferiti al  $V_{m,dry}$  (figura 79), per quasi tutte le miscele la percentuale di vuoti rientra nei limiti del range previsto dal Capitolato ANAS (3-6 %), con qualche leggera eccezione; la miscela B è quella con la percentuale di vuoti residui più alta (6,2 %) ma considerando un margine di errore di  $+ o - 0,3\%$  si possono comunque considerare all’interno del range. Si deve far notare tuttavia come tutte le miscele sono al limite superiore del range.
- Quando osserviamo i valori di ITSMm (figura 88), si può notare che nella miscela contenente bitume 70/100 additivato con SBS e compound in rapporto 60/40 (A) ha i valori più alti, all’incirca uguali a 7000 Mpa; quindi sembra che:
  - l’aggiunta di percentuali di 60% di SBS e 40% PFU al bitume comporta un conglomerato bituminoso più rigido rispetto alle altre miscele con differenti bitumi;
  - la presenza invece di bitume 70/100 additivato comporta una miscela meno rigida.
- I valori della resistenza a trazione indiretta ITS (figura 89), risultano compresi all’interno di quelli forniti dal capitolato ANAS, per tutte le miscele utilizzate nella sperimentazione. Tutti i conglomerati bituminosi mostrano una modalità di rottura molto simile.

- Andando ad osservare il grafico delle deformazioni riguardanti la prova di fatica ITF (figura 98), contenente tutti i dati delle 4 miscele si possono notare che i valori tra di loro non si discostano di molto, ma le miscele A (sbs+compound in rapporto 60/40) e C (riferimento) hanno degli andamenti pressoché uguali a due a due data la somiglianza delle miscele B (sbs+compound in rapporto 80/20) e D (solo compound). Analizzando quindi l'andamento dei numeri dei cicli in funzione della deformazione iniziale, le miscele B e D sembrerebbero comportarsi meglio a fatica rispetto alle altre.
- Andando invece ad osservare l'andamento del numero dei cicli in funzione dello sforzo applicato (figura 99), dal grafico è chiaro come l'aggiunta delle diverse tipologie di modifica provoca, tra di loro, un cambiamento trascurabile delle caratteristiche prestazionali delle miscele. Il comportamento del conglomerato bituminoso a fatica infatti, risulta confrontabile per tutti i tipi di bitumi, dato che le miscele hanno tutte lo stesso quantitativo di aggregati con le rispettive pezzature. Globalmente, analizzando entrambe le tipologie di grafico possiamo concludere che le miscele B (sbs+compound in rapporto 80/20) e D (solo compound). Ovviamente si tratta solo di un primo risultato, per poterlo affermare con certezza sono necessarie altre prove di laboratorio che sono tutt'ora in corso in laboratorio.

Si può osservare di seguito una tabella riassuntiva:

Impasto	Rispetta i limiti del capitolato Vm,dry [3-6%]	Rispetta i limiti del capitolato ITS [0,72-1,4]
Miscela A	SI	SI
Miscela B	SI	SI
Miscela C	SI	SI
Miscela D	SI	SI

Tabella 33: resoconto del confronto con il capitolato

## **BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA**

- Felice A. Santagata, "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol. 1 e 2;
- Tesi di Laurea di varie sperimentazioni realizzate all'interno del Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche;
- UNI EN 12697-5 - Determinazione della massa volumica massima - 2008;
- UNI EN 12697-6 - Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi - 2012;
- UNI EN 12697-8 - Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi - 2003;
- UNI EN 12697-26 - Rigidezza - 2012;
- UNI EN 12697-23 - Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi - 2006;
- ANAS – Capitolato speciale di appalto – norme tecniche per l'esecuzione del contratto - parte 2;
- Prestazioni del conglomerato con bitumi ipermodificati - Strade & Autostrade Online ([stradeeautostrade.it](http://stradeeautostrade.it));
- Bitume modificato: cos'è e a cosa serve? ([cittadiniecologisti.it](http://cittadiniecologisti.it));
- Le pavimentazioni stradali: flessibili e semirigide ([ingenio-web.it](http://ingenio-web.it));
- Cos'è il Bitume e come viene utilizzato - Geoconsulting Italia;
- Bitume - Attrezzatura per Edilizia - Caratteristiche bitume ([casapratrica.org](http://casapratrica.org));
- Bitume - Materiali per Edilizia <https://www.rifaidate.it/materiali-edili/materiali-per-edilizia/bitume.asp#ixzz739GJfcuV>;
- Bitume modificato: cos'è e a cosa serve? ([cittadiniecologisti.it](http://cittadiniecologisti.it));
- PMB – Bitume Modificato | Marini ([fayat.com](http://fayat.com));
- 02. Gli asfalti modificati con gomma da riciclo.pdf ([ecopneus.it](http://ecopneus.it));
- Microsoft Word - artigo2\_ita.doc ([asphaltrubberitalia.com](http://asphaltrubberitalia.com));
- Il Green New Deal di Asphalt Rubber - Strade & Autostrade Online ([stradeeautostrade.it](http://stradeeautostrade.it));
- Riciclo pneumatici e polverino di gomma ([vrisko.it](http://vrisko.it));
- 11. Guida Signus per la produzione di bitumi modificati con polverino di gomma da PFU.pdf ([ecopneus.it](http://ecopneus.it));

- Orientarsi fra impianto continuo e discontinuo | Marini (fayat.com);
- Gli impianti d'asfalto – SITEB;
- [https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni\\_tecnici\\_volume\\_5.PDF](https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni_tecnici_volume_5.PDF);
- Un conglomerato bituminoso composito ad alta durabilità - Strade & Autostrade Online (stradeeautostrade.it);