



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**ANALISI DELLA CORRELAZIONE TRA LE PROPRIETÀ FISICHE E
MECCANICHE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO**

**ANALYSIS OF THE CORRELATION BETWEEN PHYSICAL AND
MECHANICAL PARAMETERS OF ASPHALT CONCRETE**

Relatore:

Prof. Ing. Bocci Maurizio

Tesi di Laurea di:

Lorenzo Lugli

A.A. 2019/2020

Sommario

Capitolo 1	4
INTRODUZIONE.....	4
Capitolo 2	5
CARATTERISTICHE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO	5
2.1 AGGREGATI LAPIDEI	6
2.1.1 Filler.....	9
2.1.2 Prove sugli aggregati	10
2.2 CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO.....	14
2.2.1 Tecniche di riciclaggio.....	15
2.2.2 Proprietà	16
2.2.3 Le tecniche di riciclaggio	16
2.3 ORIGINE DEL BITUME	18
2.3.1 Produzione del bitume	19
2.3.2 Chimica del bitume.....	20
2.3.3 Metodi di frazionamento	20
2.3.4 Prove sui leganti	23
2.3.5 Bitumi modificati	26
2.4 ADDITIVI	28
Capitolo 3	29
IMPIANTI DI PRODUZIONE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI.....	29
3.1 IMPIANTO DISCONTINUO	29
3.1.1 Problemi impianto	31
3.2 IMPIANTO CONTINUO	32
Capitolo 4	33
METODI DI PROVA.....	33
4.1 Analisi granulometrica (UNI EN 933-1 e 933-2).....	33
4.2 Percentuale di bitume (UNI EN 12697-1).....	37
4.3 Vuoti residui (UNI EN 12697-8)	38
4.3.2 Pressa giratoria (UNI-EN 12697-31)	39
4.3.1 Metodo Geometrico.....	40
4.3.2 Metodo Dry	41
4.3.3 Metodo con provino paraffinato.....	42
4.4 Prova ITS (UNI EN 12697-23).....	43
Capito 5	47
RISULTATI PROVE	47
5.1 Percentuale di bitume su progressiva chilometrica	47
5.1.1 Grafici Usura	47

5.1.2 Grafici Binder	48
5.1.3 Grafici Base	49
5.2 Percentuale di vuoti su progressiva chilometrica	51
5.2.1 Grafici Usura	51
5.2.2 Grafici Binder	52
5.2.3 Grafici Base	53
5.3 Percentuali di vuoti su percentuale di bitume (Carota).....	54
5.3.1 Grafico Usura.....	54
5.3.2 Grafico Binder	54
5.2.3.1 Grafici Base	55
5.4 Percentuali di vuoti su percentuale di bitume (Sfuso)	56
5.4.1 Grafici Usura	56
5.4.2 Grafici Binder	57
5.4.3 Grafici Base	59
5.5 Percentuale di vuoti su percentuale passante (Sfuso)	61
5.5.1 Grafici Usura	61
5.5.2 Grafici Binder	62
5.5.3 Grafici Base	64
5.6 Resistenza a trazione indiretta su percentuale di vuoti (Sfuso).....	66
5.6.1 Grafici Usura	66
5.6.2 Grafici Binder	67
5.6.3 Grafici Base	68
5.7 Resistenza a trazione indiretta su percentuale passante (Sfuso).....	69
5.7.1 Grafico Usura.....	69
5.7.2 Grafico Binder	69
5.7.3 Grafico Base	70
5.8 Resistenza a trazione indiretta su percentuale di bitume (Sfuso).....	71
5.8.1 Grafico Usura.....	71
5.8.2 Grafico Binder	71
5.8.3 Grafico Base	72
5.9 Resistenza a trazione indiretta su percentuale di bitume diviso percentuale passante (sfuso)	73
5.9.3 Grafico Base	74
5.10 Coefficiente di trazione indiretta su percentuale di bitume diviso percentuale passante (Sfuso)	75
5.10.1 Grafico Usura.....	75
5.10.2 Grafico Binder	75
5.10.3 Grafico Base	76

Capitolo 6	77
CONCLUSIONI	77
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	79
RINGRAZIAMENTI	80

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni le infrastrutture hanno avuto un notevole sviluppo, a causa, della notevole espansione commerciale provocata dallo sviluppo industriale, a partire dagli anni 80-90. Questo ha portato ad un notevole incremento delle componenti di traffico, ed in particolare dei mezzi pesanti.

Oltre all'incremento quantitativo è cambiato la tecnologia stessa dei veicoli, ed il carico per asse di un mezzo pesante, è di gran lunga maggiore. Sorge quindi la necessità di migliorare le caratteristiche del conglomerato bituminoso effettuando controlli nelle fasi di produzione e di stesa.

La presente tesi si concentra nella fase iniziale nella presentazione del conglomerato bituminoso andando a descrivere in dettaglio i suoi componenti e le fasi di produzione in impianto, facendo una panoramica sulle modalità di produzione, i vantaggi e le criticità degli stessi. Successivamente si descrivono le prove che sono state poi analizzate. Con i risultati di tali prove sono stati realizzati dei grafici che mettano in relazioni delle possibili criticità del conglomerato nella fase di produzione (in impianto) e/o di stesa.

La tesi è strutturata come segue:

- Capitolo 1 – Introduzione
- Capitolo 2 – Caratteristiche del conglomerato bituminoso: Nel capitolo vengono descritti le componenti del conglomerato
- Capitolo 3 – Impianti di produzione dei conglomerati bituminosi
- Capitolo 4 – Metodi di prova: In questo capitolo si definiscono le prove prese in esame.
- Capitolo 5 – Risultati prove
- Capitolo 6 – Conclusioni

Capitolo 2

CARATTERISTICHE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO

Esistono varie tipologie di pavimentazioni tra cui il progettista può scegliere in relazione alle necessità e quindi all'obiettivo da conseguire: pertanto in funzione del tipo di traffico, delle condizioni ambientali e al contorno in cui la sovrastruttura viene realizzata, si determina la tipologia di sovrastruttura più idonea.

La pavimentazione stradale, o sovrastruttura, è la parte superiore del corpo stradale, realizzata normalmente in più strati e direttamente interessata dal moto dei veicoli. Lo scopo della pavimentazione è quello di:

- trasmettere e distribuire, opportunamente attenuate, le azioni indotte dal traffico al sottofondo
- resistere ai fenomeni di degrado strutturale causato dai carichi ciclici combinati alle sollecitazioni di natura termica
- proteggere il sottofondo dalle azioni dell'acqua e del gelo
- conferire caratteristiche di aderenza e assicurando una circolazione confortevole e sicura

La pavimentazione deve garantire i requisiti per tutta la sua vita di esercizio. Essendo costituita più strati differenti, ciascuno ha un preciso compito da svolgere. Le pavimentazioni possono essere di 3 categorie:

- Rigida
- Flessibile
- Semi-Riga

Come detto nei quadri tecnici dell'Anas, le pavimentazioni flessibili, che costituiscono la stragrande maggioranza della rete via-ria urbana ed extraurbana, sono costituite da uno strato di usura superficiale in conglomerato bituminoso che si appoggia su uno strato di collegamento (i.e. binder) e uno strato di base, anch'essi in conglomerato bituminoso. Il pacchetto strutturale è completato da uno strato di fondazione in misto granulare (stabilizzato o non) che tra-sferisce i carichi al sottofondo. Questo tipo di pavimentazione, a differenza di quelle rigide, permette una più graduale distribuzione del carico al piano di sottofondo attraverso il sistema stratificato. [1]

Pavimentazione flessibile tradizionale



Fig. 1 Pavimentazione flessibile

Lo strato di Base ha la funzione di trasferire agli strati sottostanti (in particolare al sottofondo), in maniera adeguatamente attenuata, i carichi verticali e orizzontali in modo che non si verifichino deformazioni o rotture.

Lo strato di Binder anche detto “strato di collegamento” rappresenta lo strato di transizione tra quello di base e quello più superficiale (usura). Ha il compito di rendere il piano di posa regolare così da garantire un’adeguata planarità per una buona stesa del sovrastante strato di usura. Deve anche avere le caratteristiche necessarie di pendenza della struttura.

Lo strato di Usura è lo strato più superficiale, quello che chiude il pacchetto strutturale, che sta a contatto diretto con i carichi. Esso deve garantire un’adeguata regolarità del piano, adeguata aderenza e assicurare condizioni di comfort sia in caso di pavimentazione asciutta che bagnata.

Il conglomerato bituminoso a caldo, di tipo tradizionale, è costituito da: una miscela di aggregati lapidei, legante bituminoso (tradizionale o modificato), additivi ed eventualmente, materiale riciclato proveniente da vecchie pavimentazioni arrivate a fine vita (fresato).

Si andranno ora ad approfondire singolarmente le componenti del conglomerato bituminoso e le interazioni che ci possono essere tra di loro.

2.1 AGGREGATI LAPIDEI

Gli aggregati, secondo la definizione data dalle norme UNI EN 13242/13043/12620, sono materiali granulari utilizzati nelle costruzioni. Possono essere di tre tipologie:

- **Naturali:** provengono dalla frantumazione di roccia compatta o sciolta.
- **Artificiali:** provengono da scarti di lavorazione delle industrie ed i più utilizzati in campo stradale sono la: loppa d’altoforno e l’argilla espansa. Entrambi possono essere progettati e prodotti su misura
- **Riciclati:** Provenienti da demolizioni o dalla scomposizione di pavimentazioni esistenti

Gli aggregati possono essere equiparati sulla base di queste caratteristiche, ma la condizione che ne determina la possibilità d'impiego è che i parametri che misurano le proprietà chimiche e tossicologiche dei materiali (soprattutto nel caso di quelli artificiali e riciclati) oltre che quelle fisiche e meccaniche rientrino in certi intervalli.

Per la classificazione degli aggregati deve essere eseguita l'analisi granulometrica che consiste nel definire la distribuzione percentuale delle dimensioni dei grani. L'analisi granulometrica si fa per vagliatura (crivelli o setacci) oppure mediante sedimentazione quando si è in presenza di materiale fine.

Oltre alla curva granulometrica, il materiale viene caratterizzato attraverso delle pezzature, di solito indicate nel seguente modo: d/D, d dimensione minore, D dimensione maggiore. All'interno di ogni pezzatura il materiale sarà variamente distribuito e avrà una propria curva granulometrica.

Gli inerti vengono classificati in base alle loro dimensioni. Per gli inerti usati nella costruzione del sottofondo e della pavimentazione si fa riferimento alla norma UNI 10006 che divide i grani in base alle dimensioni e in base al fatto che siano dotati di spigoli vivi o arrotondati. [3]

<i>DIMENSIONI</i>	<i>SPIGOLI ARROTONDATI</i>	<i>SPIGOLI VIVI</i>
> 71 mm	ciottolo	pietra
25-71 mm	ghiaia	breccia
10-25 mm	ghiaietto	breccetta
2-10 mm	ghiaino	brecciolino
0,050-2 mm	sabbia	sabbia
0,005-0,050 mm	limo	limo
< 0,005 mm	argilla	argilla

Fig. 2 Classificazione degli aggregati secondo UNI 10006

2.1.1 Aggregati tradizionali

Possiamo dividere gli aggregati in tradizionali e alternativi. Per tradizionali ci riferiamo agli aggregati lapidei che possono essere un materiale di frantumazione (da cave) o materiale di origine alluvionale. Per la costruzione della sovrastruttura stradale progettazione si preferisce un aggregato frantumato, rispetto ad uno alluvionale che risulta solitamente arrotondato, poiché l'aggregato che ha subito un processo di frantumazione rimane più spigoloso e con un maggior attrito interno. Dobbiamo anche tener conto che per ottenere un aggregato frantumato sono necessari dei processi industriali costosi, perciò per limitare i costi è possibile utilizzare inerte non frantumato per impieghi meno "importanti".

L'aggregato lapideo può provenire da rocce ignee, sedimentarie o metamorfiche.

2.1.1.1 Rocce ignee

Sono costituite da una struttura cristallina, formatesi per raffreddamenti da masse fuse incandescenti (magma). Quando parliamo di rocce ignee è importante fare una suddivisione tra rocce ignee intrusive ed effusive. Le intrusive sono caratterizzate da un lento processo di raffreddamento a differenza di quelle effusive che hanno subito un rapido raffreddamento.

Le rocce ignee sono idonee all'uso in relazione alle loro caratteristiche di resistenza e di durezza e alla presenza di silice. La silice non si riesce a legare con il bitume e ciò provoca problemi di adesione.

Rocce come porfidi e i basalti sono particolarmente ricercate perché hanno delle caratteristiche di resistenza e di durezza che le rendono idonee ad un impiego negli strati superiori delle pavimentazioni maggiormente sollecitati dal traffico. [3]



Fig.3 Basalto nero

2.1.1.2 Rocce sedimentarie

Le rocce sedimentarie rappresentano una categoria di rocce che si trovano con grande frequenza in natura, anche nel territorio marchigiano vi è una ricca quantità di rocce sedimentarie.

Per gli usi stradali le principali rocce sedimentarie usate sono i calcari sia negli strati di fondo e sia negli strati di usura in cui le sollecitazioni non sono particolarmente intense. Infatti, nelle applicazioni più importanti, come quelle autostradali, ci si orienta verso aggregati con proprietà migliori quali porfidi e basalti o anche verso aggregati di tipo artificiale come scorie di acciaieria. [3]



Fig.4 Roccia Calcarea

2.1.1.3 Rocce metamorfiche

Le rocce metamorfiche sono divise in due classi: le rocce scistose e le rocce non scistose. Le rocce scistose per le loro caratteristiche non sono ricercate nel settore stradale. Le rocce non scistose hanno delle proprietà meccaniche abbastanza buone e in diverse situazioni possono trovare impiego. [3]

2.1.1 Filler

Tra i materiali tradizionali si deve ricordare anche il **filler** che è la frazione di aggregato avente dimensioni minori di 0,075 mm secondo la norma CNR 139 (la normativa UNI EN 933-1 invece richiede l'utilizzo del setaccio da 0,063 mm). Un aggregato per essere considerato come tale deve avere dei requisiti necessari che sono:

- Percentuale passante al setaccio 2 mm, pari a 100 %
- Percentuale passante al setaccio 0.125 mm, pari a 85-100 %
- Percentuale passante al setaccio 0.063 mm, pari a 70-100 %

L'unione del filler con il bitume genera "mastice", che va a controllare le proprietà delle miscele come:

- evita il trasudamento
- previene lo spogliamento
- aumenta la stabilità delle miscele



Fig.5 Filler

2.1.2 Prove sugli aggregati

Sugli aggregati si possono fare una serie di prove volte ad accertarne le proprietà fisiche e chimiche. Le prove in questione riguardano:

1. Analisi granulometrica
2. coefficienti di forma e di appiattimento (utilizzati per valutare il grado di poliedricità dei granuli)

Questi parametri misurano le caratteristiche di poliedricità dei granuli. Le particelle cubiche (poliedriche) rappresentano la forma più adatta rispetto a quelle piatte ed allungate poiché impediscono la compattazione o tendono a rompersi, le particelle. Mentre invece le particelle (ruvide e) frantumate, garantiscono un maggiore attrito interno rispetto a quelle arrotondate.



Fig.6 Calibro a Cursore

3. equivalente in sabbia

L'equivalente in sabbia misura la pulizia dell'inerte, in particolare la pulizia della frazione fine dell'inerte e la presenza di materie organiche. Una porzione di sabbia passante a 4 mm (setaccio 4,76 ASTM), con una soluzione flocculante sono aggiunte in un cilindro graduato ed agitati. La soluzione flocculante forza le particelle fini sospensione della sabbia.

4. massa volumica dei granuli
5. assorbimento d'acqua
6. resistenza alla frammentazione (prova Los Angeles)

Gli aggregati sono soggetti ad urti e mutua abrasione causati da sollecitazioni esterne (traffico, effetti termici) che ne provocano frantumazione ed abrasione. La resistenza alla frammentazione

per urto ed abrasione si misura con la prova Los Angeles. All'interno del cilindro vengono inseriti 5000 grammi della frazione di prova ed un certo numero di sfere di acciaio che rotolano insieme al materiale e che, per la presenza della mensola nella superficie interna del cilindro, sono trascinate in alto e cadono (con un effetto d'urto) sul materiale che è in basso. Al termine della prova il materiale viene fatto passare al vaglio da 1,68 mm e si pesa il trattenuto. Il passante è la polvere che il materiale ha prodotto.



Fig.7 Cilindro della prova Los Angeles

Come da capitolato Anas si hanno dei valori di Los Angeles per ogni strato:

- lo strato di usura il 20%,
- la base e il binder 25%,
- per fondazioni in misto granulare e in misto cementato 30%.

7. resistenza all'usura (prove Micro-Deval)

La prova Micro-Deval è la prova che misura l'usura per attrito sulle pezzature più piccole. Tale prova consiste nel far rotolare all'interno di un cilindro, disposto orizzontalmente, in rotazione intorno al proprio asse, 500 g di materiale lapideo e una quantità di sferette di acciaio di 10 mm di diametro in quantità correlata alla pezzatura in esame. La prova può essere eseguita sia su materiale asciutto (MDS) che umido (MDU). Sono ammessi determinati valori massimi dell'MD in funzione dello strato della pavimentazione: per quanto concerne lo strato di usura indicativamente sono accettabili valori massimi compresi nell'intervallo 15-20 %, per il binder 20-35 %, per gli strati di base legati a bitume 20-35 %.



Fig.8 Macchina prova Micro-Deval

8. resistenza alla levigazione (prova CPA e Skid Test)

Individua la capacità di un materiale di mantenere una tessitura superficiale rugosa. Questa caratteristica è fondamentale per gli strati di superficiali. Si determina con la prova CPA, che misura la resistenza di un aggregato grosso all'azione levigante dei pneumatici dei veicoli in condizioni analoghe a quelle che si riscontrano sul manto stradale.

Vengono gli aggregati in un monostampo e alloggiati sulla superficie di una ruota di dimensione note. La prova consiste nel far girare la ruota così da levigare il provino.



Fig.9 Pendolo per prova Skid Test

Lo strato di levigazione raggiunto da ciascun provino viene misurato con la prova detta "SKid Test". Consente di definire la scivolosità della superficie stradale attraverso la perdita di energia dovuta allo strisciamento radente di un pattino gommato montato all'estremità di un pendolo. Il pendolo viene lasciato cadere da una posizione orizzontale sulla superficie precedentemente bagnata con acqua.



Fig.10 Pendolo per prova Skid Test

9. resistenza ai cicli gelo-disgelo

La sensibilità al gelo caratterizza la resistenza degli aggregati lapidei a degradarsi, fratturandosi sotto l'azione ripetuta del gelo. Per valutare la resistenza al gelo può sottoporre ad esempio il materiale alla prova Los Angeles in due condizioni:

- in condizioni standard, quindi facendo la prova in condizioni normali,
- dopo aver sottoposto il materiale a 25 cicli di gelo e disgelo portandolo a basse temperature (dopo averlo preventivamente bagnato) e rialzando successivamente la temperatura.

Al termine dei cicli, si esegue la prova Los Angeles ottenendo un valore più alto rispetto a quello che si otterrebbe facendo una LA di tipo tradizionale. L'aumento del valore di LA avviene perché gli aggregati avranno una peggiore resistenza alla frantumazione poiché i cicli di gelo e disgelo ne avranno compromesso l'integrità.

Poi ci sono le prove chimiche:

1. individuazione di sostanze minerali nocive (solfati, gesso e sostanze organiche). A tal fine possono essere effettuate analisi petrografiche ed analisi chimiche
2. adesione aggregato bitume (prove di spogliamento)

In un conglomerato bituminoso il legame che si sviluppa tra gli aggregati lapidei e la pellicola bituminosa di ricoprimento è essenziale affinché quest'ultima espliciti la sua azione legante.

L'adesione tra il legante e la componente lapidea viene probabilmente prodotta da una combinazione simultanea di più meccanismi:

- ingranamento meccanico
- coesione dovuta alle reazioni chimiche all'interfaccia
- adesione fisica

L'adesione aggregato-legante è influenzata da proprietà fisiche come la porosità, la consistenza e l'aspetto superficiale dei due materiali in contatto mentre nella teoria chimica l'adesione dipende dal pH di tali materiali. La penetrazione di acqua all'interfaccia bitume-aggregato può infatti portare all'indebolimento e all'eventuale perdita del legame di adesione. Tale fenomeno, detto spogliamento (stripping), determina un deterioramento delle proprietà meccaniche del conglomerato bituminoso con conseguente compromissione della durabilità della pavimentazione stradale.

Si valuta il grado di spogliamento viene valutato su di un campione di aggregato di classe 7/14 totalmente ricoperto di bitume. A seguito di un predefinito processo di immersione in acqua e di ebollizione si scinde il bitume dall'aggregato. Viene poi fatta un'indagine visiva (da parte dell'operatore) per valutare, dopo tali processi, in quanta percentuale il bitume è rimasto attaccato all'aggregato.

2.2 CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RECUPERO

Per conglomerato bituminoso di recupero o RA (Reclaimed Asphalt) si intende un materiale derivante dalle fasi di fresatura o scarifica degli strati di conglomerato bituminoso di pavimentazioni arrivate a fine vita. Questo conglomerato di recupero è costituito da aggregati e bitume invecchiato, e può essere caratterizzato attraverso un'analisi granulometrica così come avviene negli aggregati.

Il processo di degrado inizia tramite un processo di fessurazione, dovuto sia a fattori ambientali che a carichi veicolari a cui essa sarà soggetta. Il carico veicolare, in particolare l'azione dovuta ai veicoli pesanti, come si può dedurre facilmente, incide in modo significativo sul degrado della sovrastruttura.

I fattori ambientali, specialmente, tendono ad interessare prevalentemente gli strati più superficiali della pavimentazione: il conglomerato bituminoso, esposto a variazioni termiche e ai raggi ultravioletti, subisce il processo di invecchiamento, consistente nella perdita progressiva delle componenti organiche volatili presenti nel bitume, che porta alla graduale perdita di caratteristiche meccaniche come viscosità ed elasticità. Questa prima fase di invecchiamento, che comporta l'irrigidimento del materiale, ha come conseguenza una maggior suscettibilità agli sforzi ciclici di compressione e trazione del manto più esterno, generati dai veicoli in transito, che comportano ad una prima fessurazione. L'acqua a causa delle fessure in superficie riesce a penetrare nella struttura più interna. Se sussiste una carenza nella capacità impermeabilizzante degli strati più a diretto contatto con il sottofondo, l'acqua si inserirà in quest'ultimo causando una perdita della portanza con conseguente cedimento progressivo del piano viabile al passaggio di veicoli. [1]



Fig.11 Esempio fessurazione pavimentazione stradale

2.2.1 Tecniche di riciclaggio

Il processo di asportazione può essere eseguito con diverse apparecchiature e in modo più o meno selettivo a seconda dei successivi utilizzi:

- **Fresatrici:** consentono di demolire in modo selettivo i vari strati della pavimentazione, il che permette di separare le varie tipologie di conglomerato bituminoso demolito, in relazione al tipo di bitume e alla granulometria; il conglomerato bituminoso derivante da demolizione con frese viene chiamato fresato
- **Scarificatrici:** vengono impiegate quando non è richiesta regolarità superficiale al termine del processo di asportazione. Per mezzi scarificatrici si intendono ripper, escavatori o altre apparecchiature simili



Fig.12 Asportazione del conglomerato tramite fresa

Il riutilizzo di tale materiale è sconsigliato nella formazione di sottofondi e/o strati di fondazione non legati sia per motivi tecnici, infatti il RA senza l'aggiunta di leganti ha una scarsa capacità portante a causa della mancanza di fine e dell'attrito interno tra i granuli per la presenza del bitume, sia per motivi economici: il conglomerato bituminoso è comunque costituito da aggregati pregiati ovvero di elevate caratteristiche meccaniche e da bitume, quindi non è opportuno utilizzarlo al fine di rimpiazzare materiali più economici e facilmente reperibili.

2.2.2 Proprietà

Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del RA sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dallo strato che provengono (Usura, Binder, Base) che determina sostanziali differenze sulla natura, qualità e pezzatura degli aggregati. Le proprietà del fresato sono:

- dimensione massima delle particelle di fresato
- distribuzione granulometrica dell'aggregato
- contenuto medio di legante recuperato

E' bene poi sottolineare che per la realizzazione di strati di usura, nel caso di impiego di RA, si utilizzano solo materiali provenienti da riciclaggio di vecchie pavimentazioni di usura, poiché il riciclato del binder o base non possederebbe le proprietà idonee per essere inserito nell'usura. Il contrario invece è di solito evitato per non utilizzare un materiale di pregio (e cioè RA di usura) in uno strato che non deve avere quelle precise caratteristiche prestazioni (su tutte aderenza e regolarità), ma altre (resistenza e buona ripartizione dei carichi).

2.2.3 Le tecniche di riciclaggio

Il fresato viene utilizzato, in aggiunta agli aggregati vergini, bitume ed eventuali additivi, per la realizzazione di nuove pavimentazioni in conglomerato bituminoso. In relazione alle sue proprietà meccaniche, alle caratteristiche che devono avere i vari strati della pavimentazione e in virtù sia delle caratteristiche degli impianti di miscelazione che dei risultati ottenuti dalle ricerche su tale materiale i capitolati e le norme di riferimento prevedono, tendenzialmente, tali percentuali massime di rap da inserire nella miscela:

- Strato di base: 30 RA
- Binder: 20÷25% RA
- Strato di usura: 15% RA

Le tecniche di riciclaggio, si possono effettuare in situ o in impianto ed i metodi di riciclaggio si dividono in 2 categorie principali:

1. Riciclaggio a freddo
2. Riciclaggio a caldo

2.2.3.1 Riciclaggio a freddo

Tale tecnica di riciclaggio consiste nell'utilizzo di RA e di aggregati lapidei di primo impiego senza una fase preventiva di riscaldamento, ma miscelandoli con il legante a temperatura ambiente. Il riciclaggio a freddo presenta dei vantaggi che ne fanno un'alternativa sempre più utilizzata di riqualificazione e manutenzione della pavimentazione:

- riduzione delle emissioni di fumi, polveri e gas prodotti durante la fase di riscaldamento
- limita lo sfruttamento delle risorse ambientali per la riduzione dell'attività estrattiva degli aggregati
- risparmio economico grazie alla durata garantita della pavimentazione che risulta equivalente a quelle realizzate con aggregati vergini
- minor utilizzo di combustibili per svolgere le funzioni di riscaldamento e movimentazione dei numerosi macchinari necessari alle produzioni a caldo

2.2.3.1.1 Riciclaggio a freddo in situ

Il processo avviene attraverso treni a unità singola o multipla. Vengono utilizzate delle macchine stabilizzatrici capaci di frantumare la vecchia pavimentazione e miscelarla sotto un'apposita campana con acqua, aggregato d'integrazione, cemento e leganti bituminosi (emulsione bituminosa e bitume schiumato). Il riciclaggio condotto in sito permette quindi di evitare la movimentazione e lo stoccaggio di materiale recuperato dalla pavimentazione ammalorata.

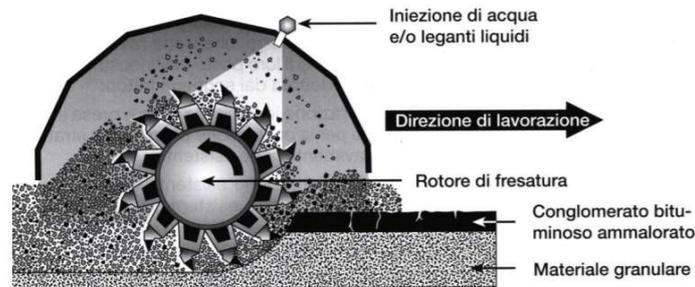


Fig.13 Rotore di fresatura-miscelazione

2.2.3.1.2 Riciclaggio a freddo in impianto

Le miscele ottenibili dal riciclaggio a freddo differiscono dalle classiche miscele. In esse sono presenti: il cemento che svolge la duplice funzione di filler e di rompere l'emulsione bituminosa (se utilizzata); la tipologia di legante bituminoso impiegato che a seconda dell'intervento da svolgere può variare dal bitume schiumato, all'emulsione di bitume tal quale o emulsione di bitume modificato; acqua. Lo studio della miscela si basa su quattro fasi fondamentali: determinazione della composizione granulometrica, determinazione del contenuto d'acqua, scelta del tipo di legante (in funzione della destinazione d'uso del materiale prodotto) e determinazione del dosaggio del legante.

2.2.3.2 Riciclaggio a caldo

2.2.3.2.1 Riciclaggio a caldo in situ

Nella tecnica di riciclaggio a caldo "in situ" del conglomerato bituminoso tutte le operazioni si sviluppano in cantiere. Ciò comporta il vantaggio di evitare il trasporto e lo stoccaggio del materiale recuperato, ma anche lo svantaggio di richiedere macchine da cantiere più complesse e costose. Le fasi operative sono realizzate per mezzo di impianti mobili e semoventi detti anche "treni di riciclaggio", costituiti da diverse macchine. Sono necessarie una fase di rimozione del conglomerato mediante preriscaldamento della pavimentazione a temperature superiori a 110°C con l'utilizzo di piastre radianti o a infrarossi; oppure si realizza una rimozione "a freddo" dello strato superficiale della pavimentazione. Segue poi uno studio della miscela dove si valutano le percentuali di aggregato e di bitume vergine che devono essere miscelate con il fresato recuperato dalla vecchia pavimentazione.

Questa tecnica di riciclaggio ha però due problematiche

- Eccessivo inquinamento causato dall'impossibilità pratica di portare su strada depuratori efficaci. Per questo motivo, ad esempio, la tecnologia non è utilizzabile nelle gallerie
- Enorme difficoltà di ottenere una correzione granulometrica esatta

Da molti anni questa tecnica è stata abbandonata, soprattutto per motivi di ordine ambientale, legati principalmente all'emissione dei fumi di bitume. Fa eccezione tuttavia il processo di riciclaggio a caldo in situ dei conglomerati drenanti. [1]

2.2.3.2.2 Riciclaggio a caldo in impianto

Negli impianti il fresato viene aggiunto alle altre componenti, previste per la miscela del conglomerato bituminoso. L'aspetto principale da tenere in considerazione è la modalità e il punto di immissione del RAP, tale scelta causerà una variazione delle modalità, dell'entità e dei tempi di riscaldamento del conglomerato di recupero andando ad influire in definitiva sulle proprietà sia del bitume già ossidato che del bitume vergine. Abbiamo quattro punti in cui è possibile immettere il fresato: [2]

- I. AL PIEDE DELL'ELEVATORE A TAZZE: Il problema di tale scelta risiede nel dover mettere a contatto aggregati caldi con il fresato a temperatura ambiente il quale causerebbe un rapido raffreddamento degli aggregati. Inoltre nella torre di miscelazione si dovrebbe sorpassare l'ulteriore fase di vagliatura. Vantaggio, minima modifica all'impianto di produzione
- II. INSERITO NEL CICLINDRO ESSICCATORE: L'introduzione diretta del RAP nel tamburo essiccatore rivolto al riscaldamento degli aggregati. Il primo svantaggio è quello di non poter effettuare l'ulteriore fase di vagliatura nella torre di miscelazione, ma il pericolo principale sta nel dover mettere a contatto il RAP con la fiamma dell'essiccatore che causerebbe la bruciatura del bitume.
- III. INSERITO NEL MESCOLATORE: vantaggio consiste nel dover apportare una minima modifica all'impianto ma si necessiterebbe di un maggior riscaldamento degli aggregati per evitare un rapido raffreddamento della miscela. Aumentare la temperatura di 30°gradi ogni aggiunta di fresato pari al 10%.
- IV. UTILIZZO DI DUE CILINDRI ESSICCATORI: risulta essere la scelta ottimale in quanto permetterebbe un trattamento separato del materiale di recupero dal materiale vergine. Lo svantaggio è il l'investimento economico e spaziale.

2.3 ORIGINE DEL BITUME

Con il termine "bitume" si intende una miscela naturale o artificiale di idrocarburi solidi o semisolidi, di colore nerastro, ottenuta da rocce asfaltiche o da petroli naturali; è usata per pavimentazioni stradali o anche come isolante o impermeabilizzante.

Il bitume non è altro che un materiale viscoelastico che a temperatura ambiente si presenta con una certa viscosità. In particolare, alle temperature minori manifesta un comportamento elastico mentre a quelle maggiori viscoso. Il suo comportamento è quindi strettamente legato alla temperatura.

Anticamente il bitume era reperibile in natura, nelle pozze ove affiorava il petrolio di giacimenti superficiali, perlopiù in Medio Oriente. Con il passare del tempo, il bitume "superficiale" iniziò a scarseggiare e si cominciò a cercarlo più in profondità. L'uomo imparò ben presto, quindi, ad utilizzare a proprio vantaggio le particolari caratteristiche di questa insolita materia nera. Il bitume veniva usato anche 180.000 anni fa, per migliorare la maneggevolezza di strumenti di varia natura grazie alle sue proprietà adesive e impermeabilizzanti. Fu usato dagli antichi egizi per sigillare le tombe dei Faraoni, mentre i Babilonesi furono i primi ad utilizzarlo nella realizzazione delle strade. Ma soltanto nella seconda metà dell'Ottocento fu utilizzato, in maniera incisiva nel mondo della viabilità.



Fig.14 Affioramento naturale di bitume

2.3.1 Produzione del bitume

2.3.1.1 Distillazione frazionaria

Il petrolio greggio è costituito da idrocarburi, che si distinguono in paraffinici, naftenici, olefinici, acetilenici ed aromatici, ossia composti formati da carbonio ed idrogeno e da piccole percentuali di altri elementi come azoto, ossigeno e zolfo. Il bitume oggi è essenzialmente ricavato dal processo di distillazione frazionaria. Il greggio arrivato in raffineria dove subisce la prima fase in cui viene sottoposto ad una temperatura di 350°C, mediante dei forni tubolari, in cui vengono separate le componenti più leggere. In questa fase si separano nafta e kerosene. Nella seconda fase si sottopone il residuo della prima fase ad una temperatura di 350-410°C (ed ad una certa pressione diversa alla pressione atmosferica). Il residuo di questa fase è il bitume il quale può essere sottoposto ad un ulteriore processo chiamato “visbreaking”, che consiste in una decomposizione termica per ridurre la viscosità del bitume, oppure al “cracking” dove si trasformano le molecole da grandi a piccole. [3]

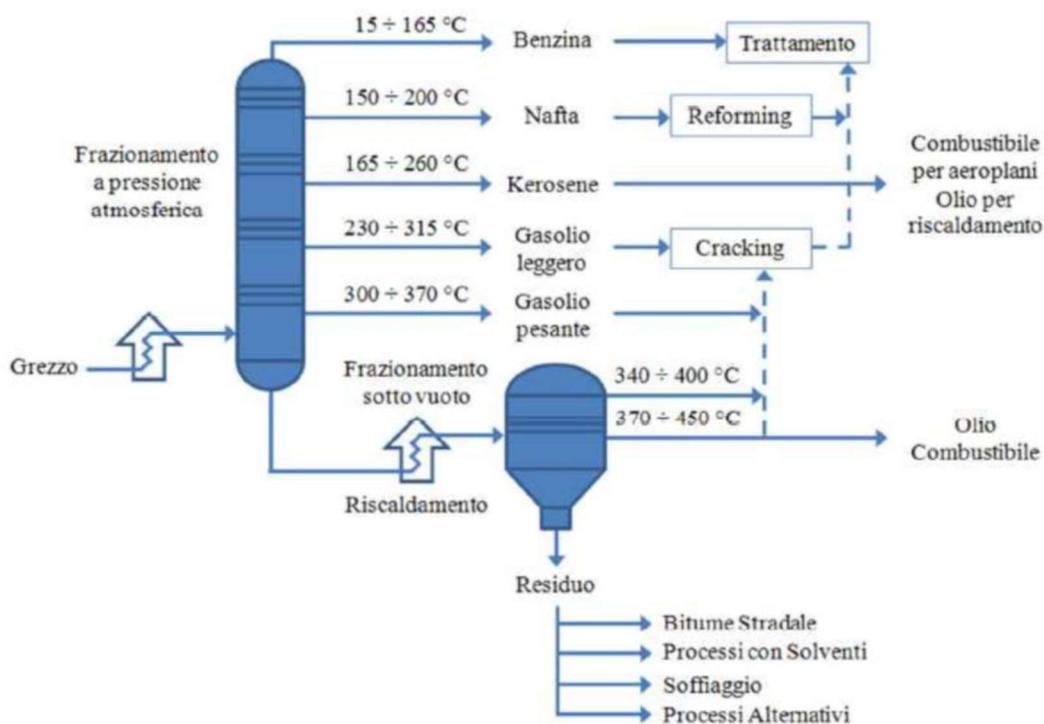


Fig.15 Schema del processo di distillazione frazionata del greggio

Il bitume ottenuto può subire ulteriori trattamenti, uno fra i tanti possibili consiste nell'aggiunta di polimeri. In questo caso il bitume prende il nome di bitume modificato caratterizzato da un miglioramento complessivo delle caratteristiche prestazionali.

2.3.2 Chimica del bitume

Il bitume è un sistema multifase costituito da miscele di idrocarburi che dipendono dal greggio di partenza, dalla profondità di estrazione e modalità di raffinazione. Nel bitume sono racchiusi molti elementi chimici sebbene il 90 % di esso è composto dai carbonio (80-85 %) ed idrogeno (9-12 %).

In Tabella, a titolo di esempio, viene riportata la composizione elementare di alcuni bitumi provenienti da petroli grezzi di differente origine.

Grezzo	Carbonio % p	Idrogeno % p	Azoto % p	Zolfo % p	Ossigeno % p	Vanadio mg/kg	Nichel mg/kg
Mexican blend	83.77	9.91	0.28	5.25	0.77	180	22
Arkansas-Louisiana	85.78	10.19	0.26	3.41	0.36	7	0.4
Boscan	82.90	10.45	0.78	5.43	0.29	1380	109
California	86.77	10.94	1.10	0.99	0.20	4	6

Fig.16 Composizione elementare di bitumi

L'analisi chimica elementare presenta due problemi non trascurabili perché non ci permette di conoscerne a fondo le caratteristiche ed inoltre presenta difficoltà operative nel suo svolgimento. Si preferisce quindi un approccio chimico-strutturale che ci permette di ottenere risultati più significativi.

2.3.3 Metodi di frazionamento

L'analisi chimico-strutturale viene effettuata tramite metodi di frazionamento che ci permettono di separare le molecole di bitume in base alla loro solubilità o grandezza.

I metodi di frazione sono:

- *Solventi selettivi*
- *Procedure di precipitazione chimica*
- *Tecniche cromatografiche di adsorbimento e desorbimento*

I solventi selettivi sono impiegati di raro in quanto separano delle frazioni non abbastanza diverse tra di loro.

Le procedure di precipitazione chimica permettono di determinare due gruppi fondamentali che costituiscono il bitume, e cioè degli Asfaltini e Malteni. Altre classificazioni tengono conto di elementi che però nel mondo delle strade giocano un ruolo secondario (Carbeni e Carboidi)

Tramite il metodo cromatografico, si fraziona il bitume in quattro categorie: Saturi, Aromatici, Resine e Asfaltini, da qui prende il nome di frazionamento SARA.

2.3.3.1 Frazionamento SARA

Il processo si articola in diverse fasi, in cui in ognuna vi è la separazione di un elemento. Nella fase iniziale vi è la separazione degli asfaltini. Si procede mescolando per 1 ora, alla temperatura di 98 °C, 12g di bitume in 1l di n-eptano e recuperando la parte insolubile.

Il processo continua sottoponendo 10g di malteni in 50 ml di n-eptano, in una colonna cromatografica contenente alluminio. Per primi si separano i Saturi, dopo gli Aromatici usando toluene, per ultime le Resine.

Il frazionamento SARA è il più utilizzato ma ad oggi abbiamo anche altre metodologie che ci permettono di frazionare il bitume.

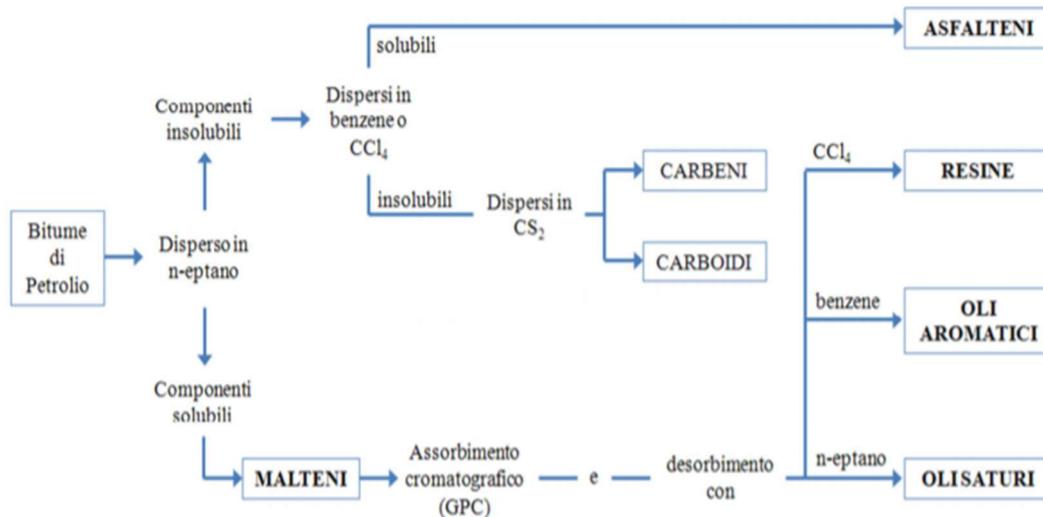


Fig.17 Frazionamento SARA

Il bitume risultata pertanto formato da:

$$\mathbf{BITUME = ASFALTENI + OLI SATURI + OLI AROMATICI + RESINE}$$

Asfaltini

Gli Asfaltini sono dei solidi amorfi che si presentano con un colore scuro. Hanno un peso molecolare molto variabile compreso tra 3'000 e 50'000, influenzano molto le caratteristiche del bitume visto che sono presenti in quantità comprese tra il 10 e il 25% in peso del totale. Sono costituiti da gruppi polari e molti anelli aromatici. Le molecole sono pseudo piane con legami π-π. La viscosità del petrolio, e quindi del bitume, è influenzata dalla presenza della concentrazione degli asfaltini. Un'eccessiva quantità di Asfaltini fa sì che il bitume risulti più duro e viscoso, con un valore di penetrazione più basso ed il punto di rammollimento più alto.

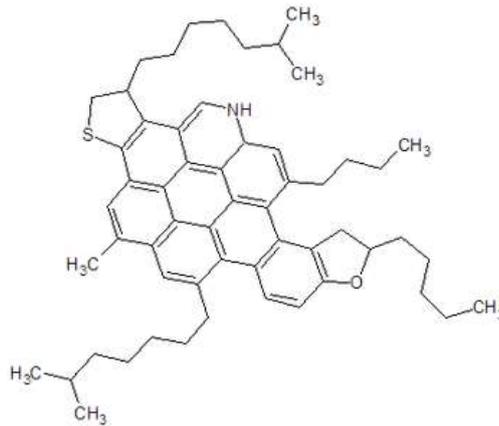


Fig.18 Struttura degli asfalteni

Oli Saturi

A temperatura ambiente si presentano come un liquido incolore, hanno un peso molecolare che si aggira sui 600g/mol. Sono presenti in percentuali tra il 5-15 % in peso e sono principalmente alifatici. Sono formati da strutture ramificate e lunghe catene alifatiche.

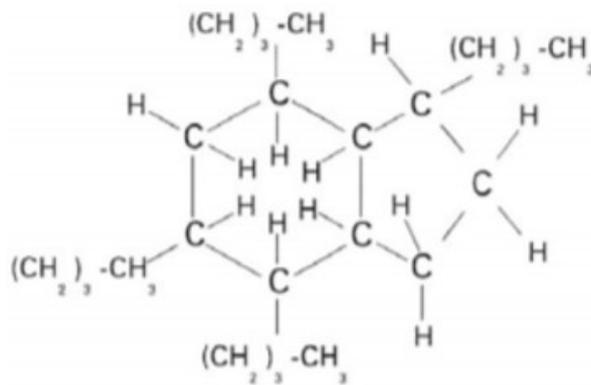


Fig.19 Struttura Saturi

Oli Aromatici

Costituiscono insieme alle resine le percentuali maggiori presenti nel bitume. Negli aromatici abbiamo il 40-60% del totale, sono più viscosi dei saturi e rappresentando un mezzo di dispersione degli Asfalteni peptizzati. Sono liquidi di colore marrone scuro, contengono degli anelli aromatici condensati e hanno un basso peso molecolare compreso fra 300 e 2'000 g/mol.

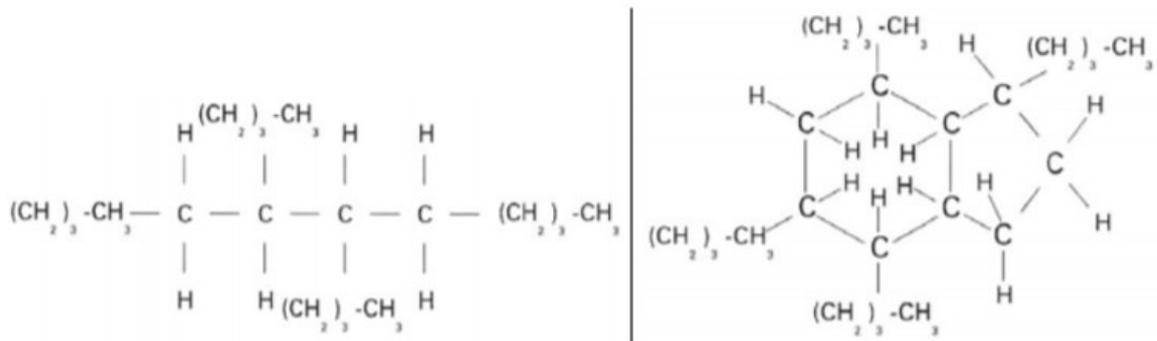


Fig.20 Struttura aromatici

Resine

Le resine sono come già detto una delle frazioni maggiormente presenti. Esse occupano una percentuale tra il 30-45 % in peso di bitume a temperatura ambiente si presentano come un solido nero, composto da anelli aromatici. Hanno il compito della stabilità del bitume, dato che sono l'agente stabilizzante degli asfalti. Il peso molecolare oscilla tra 500 e 5'000 g/mol.

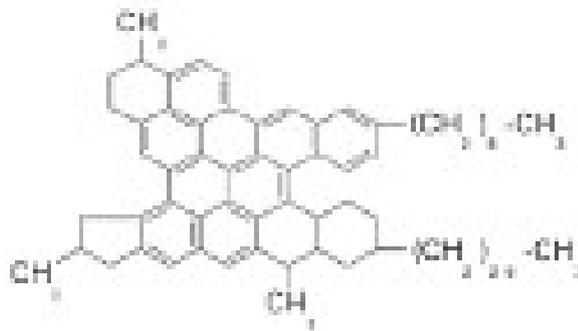


Fig.21 Struttura delle resine

2.3.4 Prove sui leganti

I leganti sono caratterizzati dalle seguenti proprietà:

- resistenza all'invecchiamento
- consistenza
- suscettività termica
- adesione
- coesione
- composizione

Di seguito si riporta una breve spiegazione delle principali prove da eseguire sui bitumi che riflettono le proprietà sopra indicate:

- prova di penetrazione
- punto di rammollimento
- prova di duttilità

2.3.4.1 Prova di Penetrazione (UNI EN 1426)

La penetrazione rappresenta la profondità, espressa in decimi di millimetro, alla quale affonda un ago d'acciaio normalizzato sotto un carico di 100 g per 5 secondi in un provino di bitume mantenuto alla temperatura di 25°C.

L'affondamento è un indice della consistenza del legante ed è quel parametro sulla base del quale vengono individuate le classi di penetrazione.

In Italia si adoperano bitumi che vanno da 40 a 220 dmm e in particolare e da questo valore si indica la classe di penetrazione del bitume.

Il che significa che per esempio un bitume 50/70 deve presentare una penetrazione a 25°C compresa tra 50 e 70 dmm. L'attuale tendenza è di usare bitumi semi-duri di classe di penetrazione 60/70 oppure 80/100 poiché dotati di caratteristiche più compatibili con il clima italiano.

2.3.4.2 Prova di palla-anello (UNI EN 1427)

Questa prova permette di determinare il punto di rammollimento in un intervallo di temperatura dai 30°C ai 150°C. Il punto di rammollimento, con il metodo palla e anello, determina la temperatura alla quale un bitume, progressivamente riscaldato, raggiunge un determinato grado di consistenza.

La prova consiste nel collocare all'interno di un recipiente contenente acqua alla temperatura iniziale di 5°C due anelli di ottone in cui sono posti i campioni di bitume. Su ciascuno di essi viene collocata una sfera metallica. La temperatura del bagno d'acqua viene progressivamente aumentata di 5°C al minuto portando così il bitume a rammollire. Il bitume presente nell'anello allora cede inglobando la pallina per effetto del suo peso. La temperatura di rammollimento è quella temperatura in corrispondenza della quale il bitume collocato all'interno dell'anello e deformato dalla sfera tocca il ripiano inferiore che si trova ad una distanza fissa di un pollice (25,4 mm).

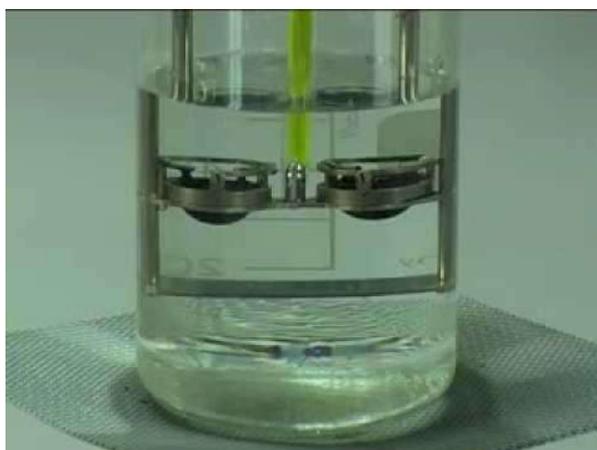


Fig.22 Apparecchiatura prova palla-anello

Fra penetrazione e rammollimento esiste una buona corrispondenza e cioè i bitumi con penetrazione più elevata (ossia molli) hanno un valore palla-anello più basso.

2.3.4.3 Prova Frass

La prova Frass misura la fragilità di un bitume a bassa temperatura tramite la determinazione del punto di rottura. Si tratta di un metodo che valuta la temperatura alla quale un bitume, progressivamente raffreddato, raggiunge un determinato grado di consistenza, ossia a quale temperatura il bitume si infragilisce al punto tale da rompersi quando viene sollecitato secondo delle particolari modalità standardizzate.

La prova consiste nello spalmare un velo di bitume di 0.4 grammi, su una lamina di acciaio. La lamina viene poi introdotta in un cilindro ed inflessa ad intervalli regolari di tempo; allo stesso tempo la temperatura viene fatta abbassare di 1°C al minuto partendo da 10°C: infatti lo spazio tra i due contenitori viene riempito di acetone, con l'aggiunta di ghiaccio. Quando la lamina di bitume si rompe si interrompe la prova e si legge la temperatura. Solitamente per bitumi classici la rottura è sui -7/8°C, se eseguo la prova su bitumi modificati arrivo a -20/25°C.



Fig.23 Apparecchiatura prova Frass

2.3.4.5 Prova di duttilità

La prova di duttilità misura la consistenza del bitume attraverso l'allungamento che può subire un provino normalizzato prima di rompersi quando viene sollecitato a trazione in determinate condizioni operative. È una prova di trazione diretta: un campione di bitume viene colato all'interno di una formella a forma di "8" dotata di una strizione centrale ed inserita in una vasca contenente acqua a 25°C. Un'estremità del campione viene tenuta ferma mentre l'altra viene progressivamente fatta allontanare con una velocità pari a 5 cm al minuto: con questa operazione il campione si assottiglia sempre di più fino a rompersi.



Fig. 24 Prova Duttività

2.3.4.6 Suscettibilità termica

Tra i diversi parametri che permettono di valutare la resistenza termica del bitume, si ha l'intervallo elasto-plastico che rappresenta la differenza fra la temperatura del punto di rammollimento e il punto di rottura. Più ampio è questo intervallo migliore è il bitume.

Un altro parametro è l'Indice di Penetrazione il quale si calcola a partire dal valore di penetrazione a 25°C di 100 g di materiale e per un tempo pari a 5 secondi e dal valore del punto di rammollimento con la prova palla e anello. Il calcolo di questo indice deriva da una serie di ipotesi formulate da due studiosi, Pfeiffer e Van Doormael.

2.3.5 Bitumi modificati

Con il termine bitumi modificati si parla di bitumi che hanno subito in processo di modifica atto a cambiare le caratteristiche fisiche, meccaniche e reologiche del bitume per utilizzarlo in condizioni particolarmente severe, o per l'esigenza di dare dei requisiti di durabilità più elevati alla pavimentazione o ancora per creare una sovrastruttura che abbia degli spessori minori delle tradizionali. Gli agenti di modifica più comuni sono:

- Filler
- Polverino di gomma
- Cere paraffiniche
- Fibre
- Polimeri

Per quanto riguarda i bitumi modificati i principali modificanti sono i polimeri. Il polimero è un composto chimico complesso costituito da molecole che derivano dall'unione di unità elementari chiamate monomeri. La natura dei polimeri può essere o sintetica o naturale. Tra i due trova maggior impiego i sintetici che si dividono in due categorie:

1. *Plastomeri*: i quali Incrementano le sollecitazioni a rottura
2. *Elastomeri*: migliorano il comportamento elastico e duttile della miscela finale con un incremento della deformazione, della sollecitazione a rottura e della resistenza a carichi ciclici

Fra gli elastomeri si annoverano il polietilene (PE) nelle due versioni, a bassa (LDPE) e ad alta (HDPE) densità, il polipropilene atattico (APP), l'etilene-vinil-acetato (EVA) - che è uno dei polimeri di maggior impiego nel campo degli elastomeri - e l'etil-metil-acrilato (EMA). Fra i plastomeri trovano soprattutto impiego l'SBR (gomme stirene-butadiene) e l'SBS (stirene-butadiene-stirene).

Il bitume modificato viene chiamato Hard se la percentuale di polimeri utilizzata nella miscela è del 5 %, invece se la percentuale è del 3 % il bitume modificato prende il nome di Soft (Medium se pari al 4%).

Il bitume modificato presenta un maggiore intervallo di elastoplasticità, maggiore resistenza alle deformazioni, alla fatica e all'invecchiamento, maggiore adesione con gli inerti; accanto a queste proprietà positive vi è quella negativa dell'innalzamento della temperatura di miscelazione del conglomerato di bitume modificato, la quale raggiunge il valore di 190 °C o più, contro i 170 °÷ 180 °C di un conglomerato bituminoso normale. Questo aspetto è da non sottovalutare in quanto per via della richiesta di maggiore riscaldamento si produce una quantità maggiore di fumi inquinanti per l'ambiente e tossici per gli operatori. [4]

2.4 ADDITIVI

La prima cosa che dobbiamo dire sugli additivi è quella che loro a differenza dei polimeri non modificano chimicamente il bitume ma ne migliorano le prestazioni.

Come requisito generale, gli additivi, qualunque sia la loro natura, non devono essere pericolosi per un ampio intervallo di temperatura, dalla produzione all'applicazione. Vi sono molti additivi che vengono usati nei conglomerati bituminosi che migliorano la resistenza allo "strappo" o migliorano la lavorabilità a basse temperature. Generalmente, gli additivi vengono utilizzati per migliorare la resistenza all'acqua e per incrementare la durata della vita utile del conglomerato. La resistenza dei conglomerati bituminosi a freddo è minore di quella dei materiali comunemente utilizzati a caldo e i primi sono più sensibili a condizioni meteorologiche severe e agli effetti del traffico.

Quando si parla di additivi ci si riferisce a due categorie:

1. Rigeneranti
2. Flussanti

È dimostrato, che il rigenerante tende a ripristinare le proprietà meccaniche del bitume invecchiato, agendo sulla struttura del bitume e avendo un effetto di ristrutturazione. D'altro canto, è dimostrato che l'azione di un agente flussante diminuisce la temperatura di transizione degli elementi; questo può essere spiegato da un incremento della parte maltenica e da quello che viene detto "effetto solvente" che si verifica.

Quando parliamo di attivi flussanti ci riferiamo a sostanze, estratte da oli lubrificanti e diluenti, costituite da maltenici, naftenici che hanno lo scopo di rendere il bitume più duttile e meno viscoso. Essi portano una ricostruzione a livello strutturale.

Nell'ambito del riciclaggio a caldo del fresato vengono utilizzati degli additivi detti rigeneranti che hanno il compito di integrare il bitume invecchiato del fresato con le sostanze che si sono perse o modificate durante il processo di invecchiamento e migliorarne le proprietà di adesione, consistenza e viscosità, migliorando perciò le prestazioni del conglomerato bituminoso finale. Gli additivi rigeneranti devono essere costituiti da una grande porzione di aromatici e una bassa percentuale di saturi.

Capitolo 3

IMPIANTI DI PRODUZIONE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

Al fine di trasformare aggregati e bitume in conglomerato bituminoso è indispensabile uno specifico impianto. In linea di massima esistono due diverse lavorazioni per la produzione del conglomerato bituminoso: il processo continuo e discontinuo.

Il divario sostanziale tra i due impianti consiste nella miscelazione che, nell'apparecchiatura fissa risulta essere costante, mentre in quella mobile è presente un'interruzione d'esercizio, infatti, all'incirca ogni 40-50 secondi si ottiene un impasto.

3.1 IMPIANTO DISCONTINUO

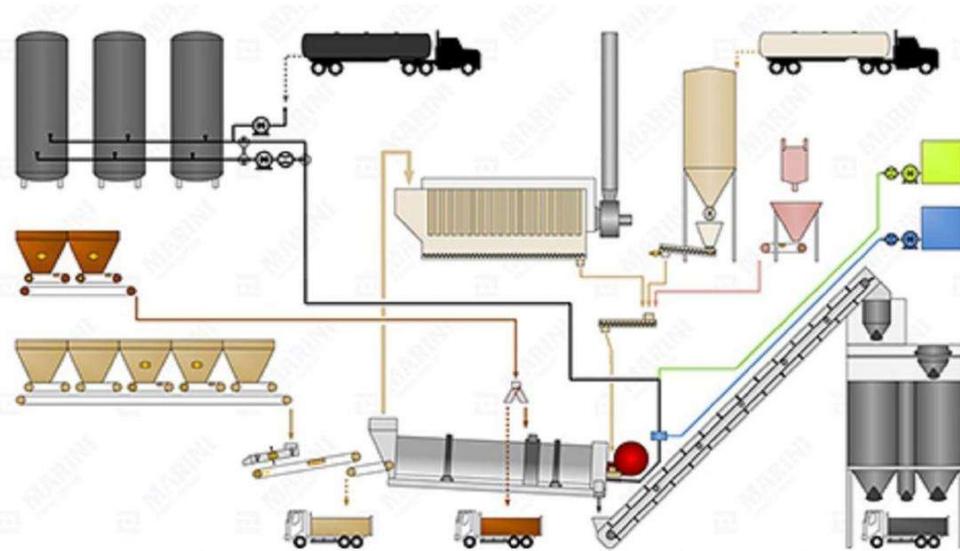


Fig. 25 Impianto di tipo discontinuo

E' l'impianto più diffuso in quanto permette una maggiore flessibilità di utilizzo con una maggiore qualità di prodotto finale e si riesce ad avere anche un controllo superiore dell'emissione dei fumi, grazie alla presenza del filtro. La discontinuità del macchinario ha dei vantaggi notevoli in quanto permette un maggior controllo del lavoro che si sta svolgendo con possibilità di correzione. E' inoltre possibile variare la mescolatura in base ai materiali d'utilizzo, caratteristica mancante negli impianti continui in cui il lavoro rimane costante.

Come viene utilizzato l'impianto discontinuo?

1. In primo luogo bisogna considerare che il materiale viene disposto in cumuli, secondo le classi di aggregato, ed inserito tramite delle pale cariatrici all'interno di vasche.

2. Il materiale dosato viene condotto su un nastro trasportatore dotato di un sistema di bilancia per il continuo controllo della loro massa (col compito di pesare le quantità delle varie frazioni granulometriche (o la quantità di materiale che è tale da riprodurre la curva granulometrica) da inserire. Il nastro giunge al cilindro essiccatore.
3. Il cilindro essiccatore è un tubo d'acciaio di forma cilindrica, inclinato nel verso dell'avanzamento del materiale e fornito di un'apposita palettatura interna che solleva il materiale. Nel cilindro si svolgono queste operazioni:
 - Nella prima, il compito è quello di far evaporare l'acqua contenuta nel materiale portandolo ad una temperatura adatta di 150°-160°C per la miscelazione con il bitume.
 - nella seconda, gli inerti perdono tutta l'umidità contenuta, essiccandosi: in questa zona la temperatura non aumenta, ma rimane costante
 - nella terza, la temperatura degli inerti, oramai completamente essiccati, aumenta fino a che il materiale non esce dal cilindro [6]

Il calore viene generato da una fiamma che viene trasportata da un ventilatore che può funzionare corrente o controcorrente, generalmente quelli equicorrente vengono utilizzati per impianti di asfalto di tipo "continuo", mentre in controcorrente vengono utilizzati negli impianti di tipo "discontinuo", come nel caso in esame.

In questa fase, all'interno del cilindro, si forma una considerevole quantità di gas contenenti aria, polveri e prodotti della combustione che devono essere filtrati prima del rilascio in atmosfera in modo da recuperare il filler e far fuoriuscire solo vapore acqueo. Al fine di evitare che la macchina si saturi di polvere è presente un impianto di filtraggio a manica dove sono presenti filtri di stoffa che catturano la polvere in eccesso.

4. Una volta concluso il ciclo all'interno del cilindro gli aggregati, hanno una temperatura di 150-160°C, vengono trasportati mediante un elevatore a tazze, alla parte più alta della torre di miscelazione. Vengono rifelezionate le frazioni granulometriche tramite i vagli vibranti degli aggregati i quali vengono successivamente condotti in contenitori specifici noti come sili a caldo, costituiti da dispositivi di scolmatura che hanno il compito di eliminare il materiale in eccesso. Il materiale viene ora ripesato in modo da correggere eventuali errori controllando quindi la veridicità\funzionalità\validità\correttezza del processo.
5. A questo punto il materiale viene inviato al mescolatore collocando in primis gli aggregati caldi, seguito da bitume caldo, eventuali additivi ed un filler che blocca il bitume attorno gli aggregati. Se venisse inserito primariamente il filler del bitume, si mescolerebbero insieme formando dei "grumi" insieme non aderendo così agli aggregati. Il bitume viene invece trasportato in stato semisolido da autocisterne, ed è stoccato in serbatoi metallici, coibentati con lana di roccia ad alta densità e rivestiti con un mantello di alluminio, posti in aree ben delimitate.

6. Al termine della miscelazione il conglomerato bituminoso viene scaricato direttamente sugli automezzi o depositato su un silo di stoccaggio. [7]

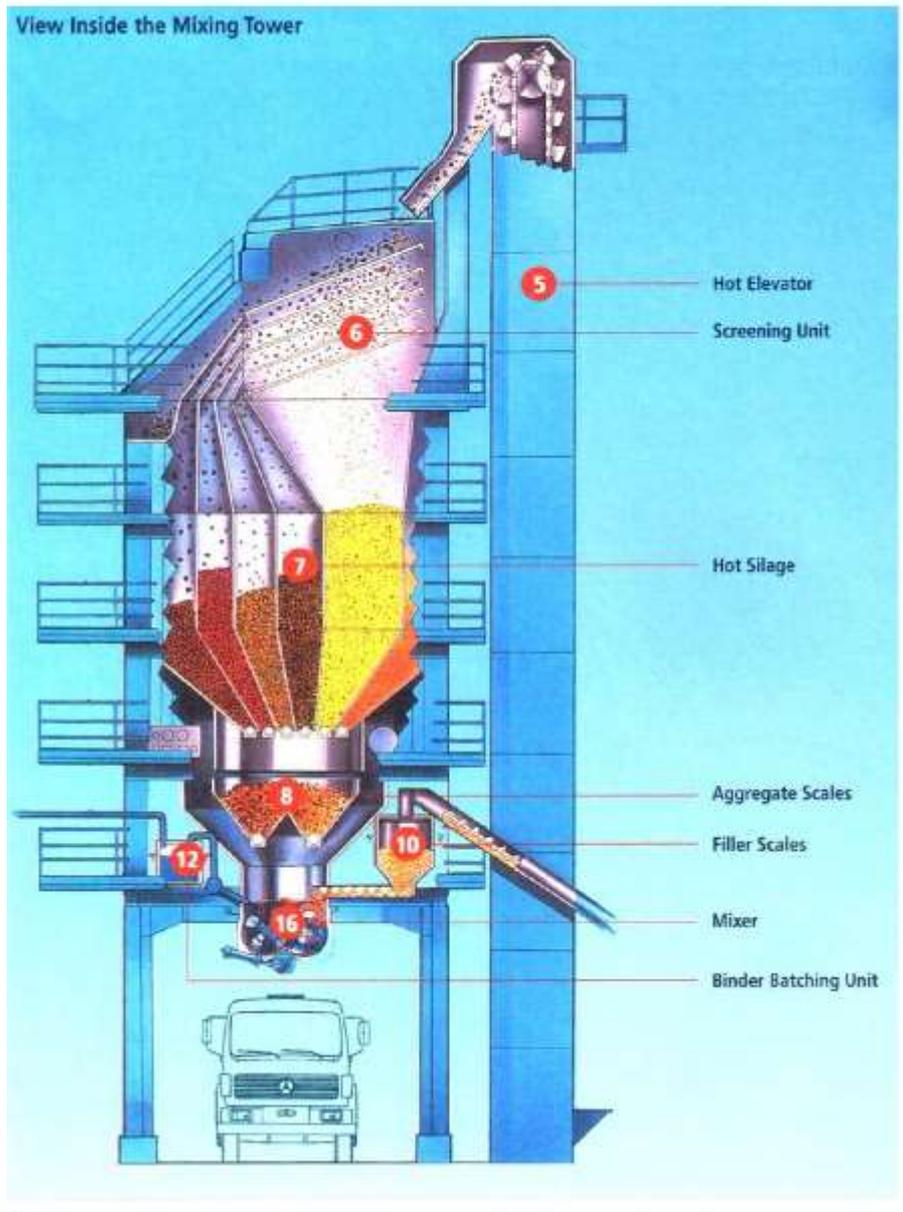


Fig. 26 Torre di miscelazione

3.1.1 Problemi impianto

Questo impianto presenta però dei difetti, infatti nel caso di intasamento dei vagli, a causa di un eccesso di materiali, gli aggregati fini tendono a galleggiare al di sopra di quelli di maggiore dimensione ricadendo all'interno del contenitore corrispondente alla classe errata. Si avrà così una miscela finale più ricca di frazione fina, caratterizzata da un minor grado di ricoprimento delle particelle da parte del bitume a seguito della maggior superficie specifica. Si otterrà così una miscela con delle incongruenze rispetto a quella richiesta. [5]

Devo tenere anche in conto che nel contenitore degli inerti caldi del materiale fino finiscono gli aggregati appartenenti a più classi granulometriche, se la proporzione tra le varie frazioni non è correttamente imposta sin dall'inizio del processo, otterrò una curva granulometrica diversa da

quella teorica. Ciò dimostra che la suddivisione in frazioni nella torre di miscelazione non garantisce la perfetta realizzazione della curva di progetto senza il corretto dosaggio nelle vasche di alimentazione del cilindro essiccatore. [3]

3.2 IMPIANTO CONTINUO

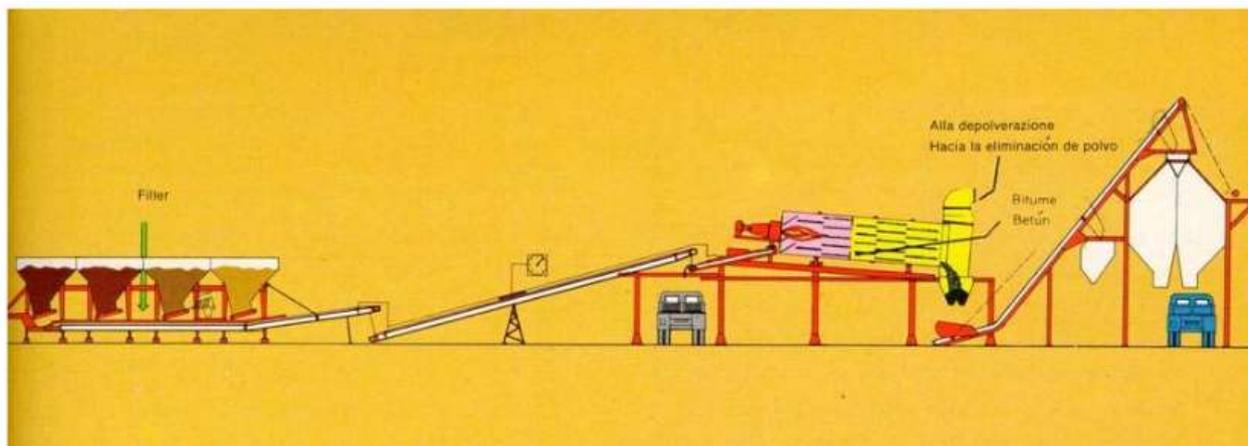


Fig. 27 Impianto di tipo continuo

Lo scopo di questo impianto è quello di produrre conglomerato bituminoso seguendo un processo di tipo continuo, nel quale la produzione si svolge in sostanza in un'unica unità operativa. I vantaggi di tale tipologia di impianto consistono nel minor costo di produzione, essendo l'impianto meno complesso, e una maggiore capacità di produzione data dalla continuità di esercizio. La prima differenza che si nota riguarda l'assenza della torre di miscelazione. Il processo iniziale che consiste nel deposito del materiale nelle vasche fino al cilindro essiccatore avviene in modo identico all'impianto di tipo discontinuo. Il cilindro essiccatore, come descritto in precedenza, è posto secondo corrente il che significa che la fiamma è posta a distanza dall'entrata del filler, bitume ed eventuali additivi. A questo punto bisogna fare una distinzione tra i *drum mixer*, in cui il filler, il bitume e gli additivi vengono mescolati assieme all'interno del cilindro essiccatore che, per ovvi motivi è assai più lungo, dovendo essere contemporaneamente essiccatore e miscelatore, e degli impianti più recenti che possiedono un sistema di miscelazione posto a valle.

Tra gli svantaggi troviamo una qualità del prodotto finale inferiore, a causa dei minori controlli effettuati in fase di produzione, riguardanti l'umidità, il dosaggio e la poca versatilità.

Capitolo 4

METODI DI PROVA

Nella presente tesi si vanno a confrontare le caratteristiche prestazionali e meccaniche attraverso l'indagine su carote e conglomerato sfuso nel tratto di strada SS3 bis "Tiberina" E 45. Tramite l'analisi svolte da diversi laboratori sono stati presi in considerazione 5 caratteristiche del conglomerato bituminoso che sono:

1. Analisi granulometrica
2. Percentuale di bitume
3. Vuoti residui
4. Resistenza a trazione indiretta

Si andranno ora ad analizzare nel dettaglio lo svolgimento delle prove.

4.1 Analisi granulometrica (UNI EN 933-1 e 933-2)

La prova consiste nel dividere, per mezzo di una serie di setacci, un materiale in classi granulometriche di dimensioni decrescenti. Le dimensioni delle maglie e il numero dei setacci sono scelti in base alla natura del campione.

Prima dell'inizio del processo ci può essere una fase di lavaggio del campione, solo se lo questo porti delle modifiche del campione, la procedura prende il nome di "via umida". Nel caso in cui il campione possa subire modifiche il processo deve seguire la "via secca" ciò deve saltare la fase di lavaggio.

Per facilitare la comprensione della prova verrà suddivisa in fasi:

1. Scelta del campione: In base alla dimensione massima dell'aggregato abbiamo un quantitativo minimo di campione.

Dimensione massima dell'aggregato D mm	Massa della porzione di prova (minimo) kg
90	80
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Fig.28 Massa della porzione di prova per aggregati

2. Lavaggio

Si pone il materiale in un recipiente pieno d'acqua così da far staccare i grumi dagli aggregati. Agitando il materiale si aiuta la separazione delle frazioni fini. Si fa poi passare il materiale al setaccio 0.0063mm così da dividere la parti fini. Il trattenuto al setaccio si fa essiccare al 110°C.

3. Setacciatura

Se il materiale è stato lavato, dopo aver terminato il periodo di essiccazione, viene impilato nella colonna dei setacci, e quindi setacciato. I setacci inseriti dipendono dal tipo di materiale che stiamo analizzando. Nel caso in cui abbiamo scelto la via umida è sempre necessario avere il setaccio a 0.0063 mm perché potrebbe esserci ancora materiale fine.

La colonna viene messa in vibrazione (tramite un motore al di sotto) per facilitare il passaggio del materiale tra i setacci. Lo strumento usato è un agitatore meccanico, e la durata della prova è compresa tra i 10 ed i 30 minuti dipendente dalla dimensione.



Fig.29 Colonna di setacci

4. Pesatura

Determinare la percentuale di massa di trattenuto e passante per ogni setaccio.



Fig.30 Pesatura del trattenuto e passante di ogni setaccio

5. Costruzione della curva

L'ultima fase è quella della costruzione della curva. In un grafico dove si ha:

- Ascisse: Apertura Setacci
- Ordinate: Passante Percentuale

E' possibile quindi disegnare la curva per punti, come nella figura qui sotto riportata che fa riferimento ad una curva granulometrica di una miscela sfusa in esame.

Ap. setacci (mm)	Trattenuto (g)	Trattenuto %	Cumulativo %	Passante (%)
20	0	0	0	100
16	7	1	1	99
12,5	161	14	15	85
8	260	23	38	62
4	193	17	55	45
2	166	15	70	30
0,5	156	14	84	16
0,25	55	5	89	11
0,063	47	4	93	7,3

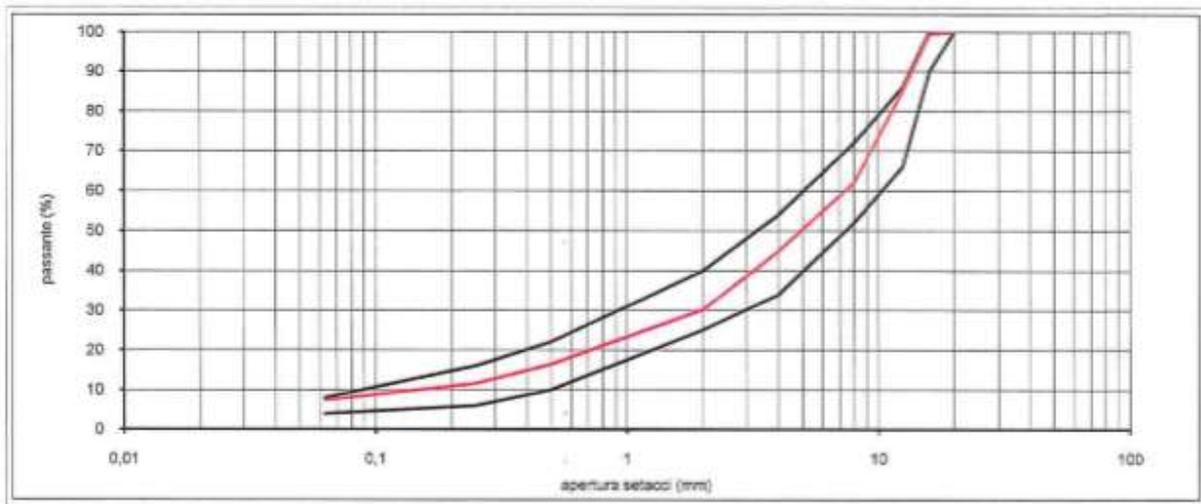


Fig.31 Curva granulometrica

E' importante ricordare che un'analisi granulometrica "esatta" deve avere il setaccio più in alto libero, cioè deve avere una percentuale di passante pari al 100 %. Questa informazione ci serve per sapere la dimensione massima dell'aggregato.

Il progettista deve confrontare la curva che si ottiene con un fuso di riferimento (a titolo di esempio verrà mostrato il fuso definito dal capitolo ANAS) delimitato da due curve, una superiore e una inferiore, che insieme formano il fuso di accettazione della miscela e fare in modo che la curva in questione sia in esso contenuta.

Per lo strato di Base il fuso granulometrico è delimitato da questi parametri:

Apertura setacci UNI	passante totale in peso %
Setaccio 31,5	100
setaccio 20	68-88
setaccio 16	55-78
setaccio 8	36-60
setaccio 4	25-48
Setaccio 2	18-38
Setaccio 0,5	8-21
setaccio 0,25	5-16
setaccio 0,063	4-8

Fig. 32 Limiti aggregati Base capitolato Anas

Per lo strato di Binder il fuso granulometrico è delimitato da questi parametri:

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

Fig. 33 Limiti aggregati Binder capitolato Anas

Per lo strato di Usura il fuso granulometrico è delimitato da questi parametri:

Apertura setacci UNI	passante totale in peso %	passante totale in peso %
	FUSO A	FUSO B
setaccio 16	100	-
setaccio 12,5	90-100	100
setaccio 8	70-88	90-100
setaccio 4	40-58	44-64
Setaccio 2	25-38	28-42
Setaccio 0,5	10-20	12-24
setaccio 0,25	8-16	8-18

Fig.34 Limiti aggregati Usura capitolato Anas

4.2 Percentuale di bitume (UNI EN 12697-1)

Il contenuto del legante influenza la tendenza della pavimentazione a deformazioni permanenti, fessurazioni per fatica e danni da umidità. Esso viene calcolato attraverso una procedura che fa sì che il bitume si dissolva grazie all'aggiunta di un solvente caldo.

Si descrive ora il processo per punto, per facilitarne la comprensione.

1. Scaldare il conglomerato bituminoso da testare in forno
2. Pesare il cestello vuoto (Tara)
3. Inserire il conglomerato bituminoso nel cestello e pesarlo (Peso campione netto)
4. Aggiungere il solvente all'interno del cilindro di vetro
5. Avviare la piastra riscaldante
6. Avviare il circuito di raffreddamento



Fig.35 Strumento per il calcolo della percentuale di bitume

Quando il solvente viene riscaldato si innesca l'ebollizione dello stesso che evapora ma arrivato al tappo, che viene mantenuto freddo attraverso un circuito di raffreddamento ad acqua, condensa e

ricade sotto forma di gocce all'interno del cestello dove si trova il conglomerato bituminoso. Il cestello, al di sotto, ha una rete che quindi trattiene il campione ma si lascia attraversare dal solvente che dopo aver percolato nel campione ricade sul fondo del cilindro di vetro. La prova si ritiene conclusa quando le goccioline di solvente che cadono dal cestello verso il fondo del cilindro di vetro sono chiare o gialle paglierino. Lasciato tutto raffreddare si conclude la prova facendo le pesate dopo estrazione.

Il problema di questa prova è che quando le goccioline attraversano il provino si portano dietro gran parte dell'aggregato denominato "Filler" falsando in tal caso la prova.

Per superare il problema si utilizza una macchina denominata centrifuga a flusso continuo la quale divide il filler dal solvente. [10]

Si passa ora a calcolare la percentuale di bitume con la seguente formula:

$$\% \text{ bit (rif. miscela)} = \frac{\text{Bitume netto}}{\text{Peso netto campione}} \cdot 100$$

Dove:

- Bitume netto: Bitume estratto dal filler
- Peso netto campione: Peso iniziale del campione

4.3 Vuoti residui (UNI EN 12697-8)

La composizione volumetrica delle miscele è una delle proprietà che maggiormente caratterizza il comportamento del conglomerato bituminoso in fase di esercizio. Le miscele sono costituite principalmente da tre componenti: come illustrato in figura

- Inerti
- Legante
- Vuoti

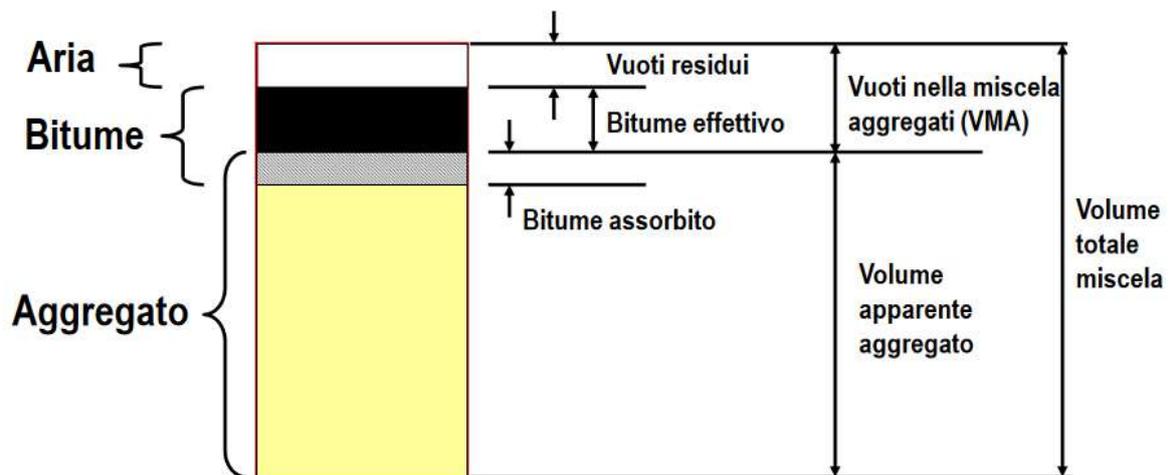


Fig. 36 Composizione conglomerato bituminoso

Le caratteristiche volumetriche sono uno dei parametri che maggiormente vanno ad influenzare le prestazioni meccaniche del conglomerato bituminoso, per tanto il capitolato ne fissa dei vincoli. Nel caso in cui i vuoti siano troppo elevati a risentirne sarà la durabilità e la resistenza meccanica della pavimentazione.

La determinazione dei vuoti può essere effettuata sia nella miscela sfusa che nella carota. Si andrà ora a descrivere la determinazione dei vuoti per le due categorie.

- Carote: È possibile utilizzare usare 3 metodi
 1. Metodo Geometrico
 2. Metodo Dry
 3. Metodo con provino paraffinato

- Miscela: Nel caso della miscela per il calcolo dei vuoti si possono utilizzare gli stessi procedimenti della carota ma è possibile ottenere 3 diversi valori di vuoti
 1. Vm_N1 [%]: I provini vengono compatti nella pressa giratoria (paragrafo 4.3.2) con 10 giri. Con questi provini si vuole simulare la situazione in cui il materiale viene sversato in situ dal camion senza compattarlo.
 2. Vm_N2 [%]: I provini vengono compattati nella pressa con 120 giri. Qui si vuole simulare il materiale che in situ viene steso e poi compattato.
 3. Vm_N3 [%]: I provini vengono compattati nella pressa con 200 giri. Qui si vuole simulare la pavimentazione “vecchia” che è stata compattata dai rulli e dal traffico veicolare nel corso della sua vita utile.

4.3.2 Pressa giratoria (UNI-EN 12697-31)

La pressa giratoria (figura 36) è un macchinario utilizzato per la compattazione dei conglomerati bituminosi sfusi. Si preparano campioni cilindrici aventi caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito mediante la compattazione dei rulli di cantiere.

Il materiale è collocato all'interno di una fustella metallica e sottoposto ad una pressione costante, la cui direzione di applicazione risulta essere inclinata rispetto all'asse della fustella stessa. Inoltre, durante il processo di compattazione, quest'ultima ruota attorno al proprio asse ad una velocità costante.

Questa metodologia di compattazione riproduce l'addensamento del materiale subito durante la fase di stesa in cantiere, dal momento che il campione è sottoposto sia ad uno sforzo di compressione verticale, che di taglio orizzontale dovuto alla rotazione della fustella attorno ad un asse inclinato.

Grazie ad un software è possibile monitorare in continuo l'altezza raggiunta dal provino ad ogni giro; i risultati possono essere visualizzati durante l'esecuzione della prova.

La pressa giratoria dispone di due tipi di fustelle, per il confezionamento di due categorie di provini di diametro differenti una da 100 mm ed una da 150 mm.

Nella presente ricerca i laboratori che eseguivano le prove hanno realizzato provini di diametro di 100 mm. Per ogni miscela venivano fatti 12 provini di cui 3 per ogni ciclo di addensamento.



Fig. 37 Pressa giratoria



Fig. 38 Provino che ha subito il processo di compattazione

4.3.1 Metodo Geometrico

Nel metodo geometrico si va a calcolare il volume del provino (nel caso di miscela sfusa o carota) con la formula matematica, otteniamo il volume, che si conoscono raggio ed altezza del provino o carota. L'ipotesi di questo metodo è che si considera come se il provino fosse tutta pieno anche se questo non è vero, infatti proprio per questa ragione è il metodo meno preciso (o meglio viene impiegato prevalentemente per provini con basso contenuto di vuoti). Calcolato il volume si pesa il

materiale e tramite una formula si calcola la massa volumica apparente, dividendo il peso per il volume.

Per calcolare la massa volumica basta conoscere il peso del provino in aria (m_1)

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

- ρ_{geom} : massa volumica apparente determinata con il metodo geometrico [kg/m^3]
- m_1 : massa del provino secco in aria [g]
- h: altezza del provino [mm]
- d: diametro del provino [mm]

Bisogna anche conoscere la massa volumica massima del provino e cioè quella massa teorica per il quale il provino non presenta vuoti.

Questo metodo viene utilizzato maggiormente quando trattiamo conglomerati chiusi.

4.3.2 Metodo Dry

La prova verrà descritta per punti:

1. Si misura la massa del provino secco in aria (m_1)



Fig. 39 Pesatura del provino

2. Si determina la massa volumica dell'acqua in base alla temperatura di esecuzione della prova (ρ_w)

Questo avviene tramite una pesatura del provino immerso in acqua (m_2)



Fig.40 Pesatura del provino immerso in acqua

Determiniamo la massa volumica apparente:

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

4.3.3 Metodo con provino paraffinato

La prova verrà descritta per punti:

1. Misurazione della massa del provino secco in aria (m_1)
2. Determinazione della massa volumica dell'acqua che varia in base alla temperatura di esecuzione della prova (ρ_w)
3. Sigillatura del provino con una tecnica normata che consiste nell'immergere il provino in un contenitore dove c'è cera paraffinica, (precedentemente scaldata) diventata liquida così da poter riempire l'intera superficie esterna del provino. In questa fase bisogna fare attenzione a non riempire i vuoti interni del provino.



Fig. 41 Provino immerso nella cera

4. Si determina la massa del provino asciutto rivestito di paraffina (m_2)

5. Il provino paraffinato viene immerso all'interno dell'acqua e ne determinata la massa (m_3)

A questo punto non resta che calcolare la massa volumica apparente:

$$\rho_{paraf} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{paraf}}\right)}$$

Questo metodo viene usato per conglomerati a freddo, conglomerati molto aperti.

Dopo aver calcolato la massa volumica apparente, è possibile calcolare la percentuale di vuoti residui

$$\% Vuoti = \frac{\rho_{max} - \rho}{\rho_{max}} \cdot 100$$

Dove:

- ρ : massa volumica apparente del materiale calcolata con uno dei 3 metodi
- ρ_{max} : massa volumica massima della materiale
- % Vuoti: percentuale di vuoti all'interno del materiale

4.4 Prova ITS (UNI EN 12697-23)

L'ultima prova analizzata è quella di trazione indiretta conosciuta anche sotto il nome di prova alla Brasiliana, la quale porta a rottura il provino tramite l'applicazione di un carico di compressione, che viene fatto variare in modo monotono con una predefinita velocità di spostamento. Per l'esecuzione di questa prova si fa riferimento alla norma UNI EN 12697-23, e viene generalmente eseguita in controllo di deformazione.

L'apparecchiatura di prova è costituita da due piatti, infinitamente rigidi e paralleli tra loro, con il piatto inferiore fisso ad una base con due guide verticali lungo le quali scorre il piatto

superiore. Il carico si trasmette al provino per mezzo di due listelli con una geometria standardizzata:

- Larghezza: 15 ± 2 mm;
- Spessore: 4 ± 1 mm;
- Lunghezza \geq Altezza del provino

Nel provino la rottura si manifesta tramite una fessura che corre diametralmente al provino 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.

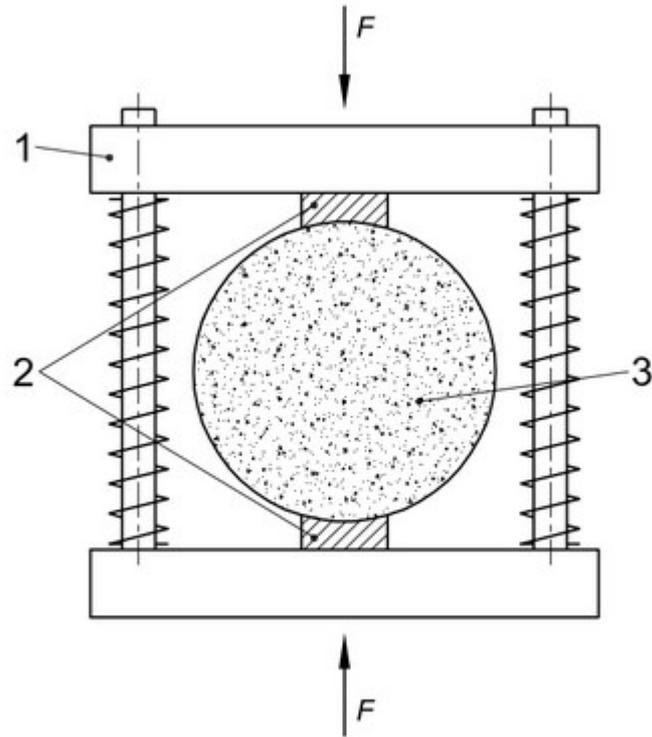


Fig. 42 Schema prova di trazione indiretta

La macchina per la prova deve essere posizionata in un locale con temperatura compresa tra 15°C e 25°C. La prova deve essere completata entro 2 min dopo che il provino è stato prelevato dal condizionamento.

Possiamo avere situazioni di rottura del provino differenti, come definito nel capitolato Anas in particolare 3 categorie:

- a) "chiara rottura per trazione": Provino chiaramente rotto lungo una linea diametrale, eccetto eventualmente per piccole sezioni triangolari vicino alle bande di carico;
- b) "deformazione" - Provini senza una linea di rottura per trazione chiaramente visibile
- c) "combinazione" - Provini con una linea di rottura per trazione limitata e vaste aree deformate vicino alle bande di carico

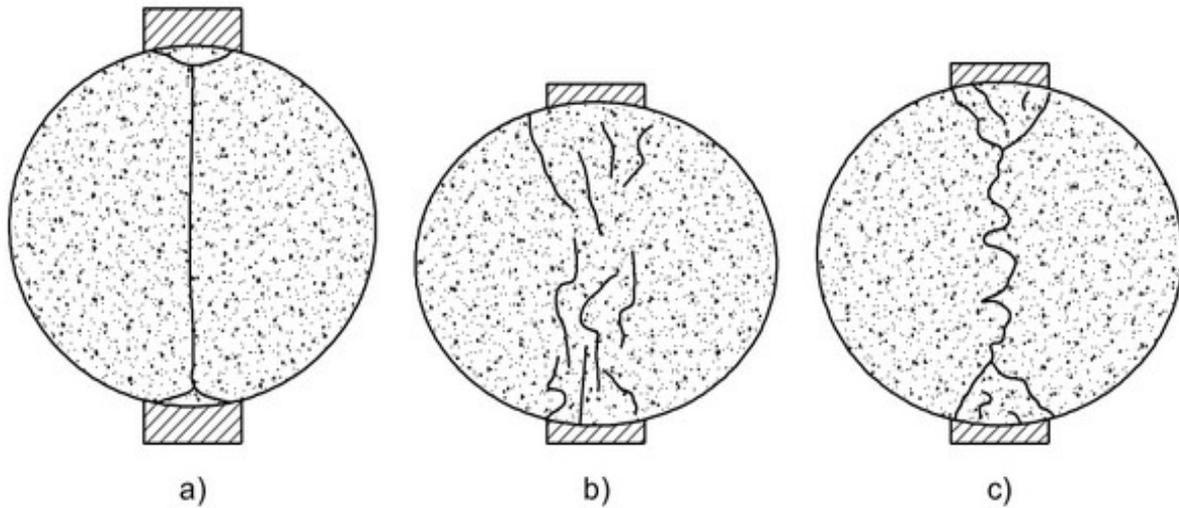


Fig. 43 Tipi di rottura

Nella prova viene calcolata la resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength) ovvero la massima trazione applicata al provino. La formula per il calcolo dell'ITS è la seguente:

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

Dove:

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



Fig. 44 Macchinario prova di trazione indiretta

Dopo aver calcolato la resistenza a trazione indiretta è possibile calcolare il coefficiente di trazione indiretta CTI (Indirect Tensile Coefficient) determinato con la seguente espressione:

$$ITC = \frac{\pi \cdot d \cdot ITS}{2 \cdot D_t}$$

Con D_t la deformazione verticale a rottura espressa in mm

I laboratori che eseguivano la prova sulla miscela sfusa, li compattavano con la pressa a taglio giratorio con un valore di percentuale di vuoti pari a V_{m_N2} , cioè facevano subire al provino 120 giri.

In particolare, si vuole quindi concentrare l'attenzione sul confrontare dei valori della ITS delle carote con quello dei provini che aveva subito una compattazione come in situ.

Capito 5

RISULTATI PROVE

In questo capitolo verranno riportati i risultati delle prove svolte dai laboratori, confrontando i risultati dei 3 strati in esame:

- Usura
- Binder
- Base

La tesi ha come scopo quello di andare a cercare delle correlazioni tra i valori delle prove eseguite sui conglomerati sciolti e sulle carote. Questo per cercare delle criticità che ci potrebbero essere state nello studio della miscela. Facendo questi confronti possiamo conoscere se l'impresa ha svolto correttamente i lavori. Ogni grafico è stato commentato andando a cercare delle correlazioni.

5.1 Percentuale di bitume su progressiva chilometrica

5.1.1 Grafici Usura

Percentuale di bitume B [%] – Progressiva chilometrica (0- 50km)

Nessun trend individuabile.

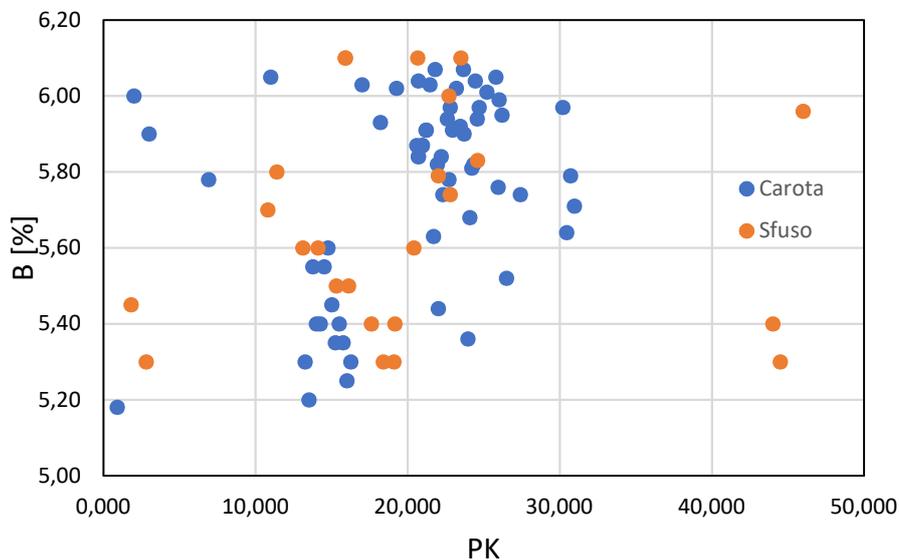


Grafico 1: B [%] – PK (0-50 Km)

Percentuale di bitume B [%] – Progressiva chilometrica (90- 140km)

La percentuale di bitume nello sfuso risulta maggiore di quello presente nello carota.

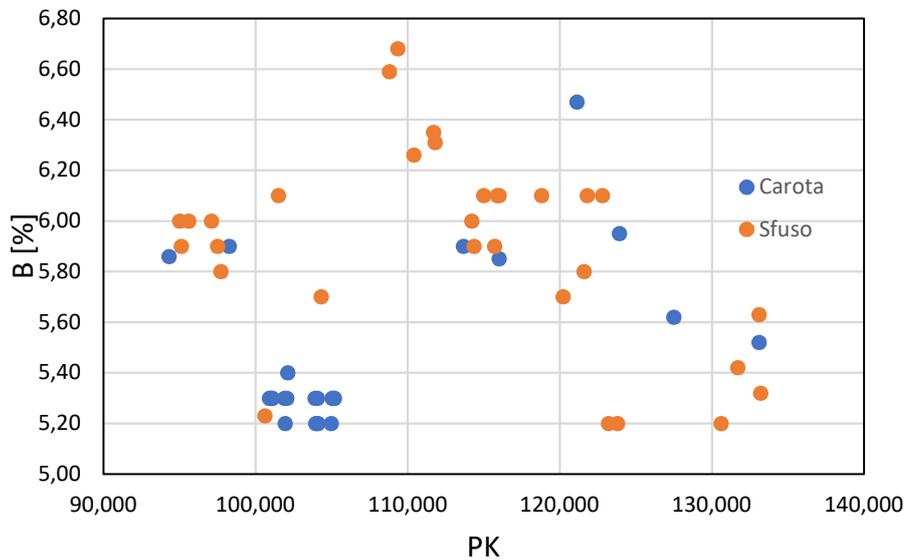


Grafico 2: B [%] – PK (90-140 Km)

5.1.2 Grafici Binder

Percentuale di bitume B [%] - Progressiva chilometrica (0- 50km)

La percentuale di bitume nella carota risulta maggiore di quella presente nello sfuso.

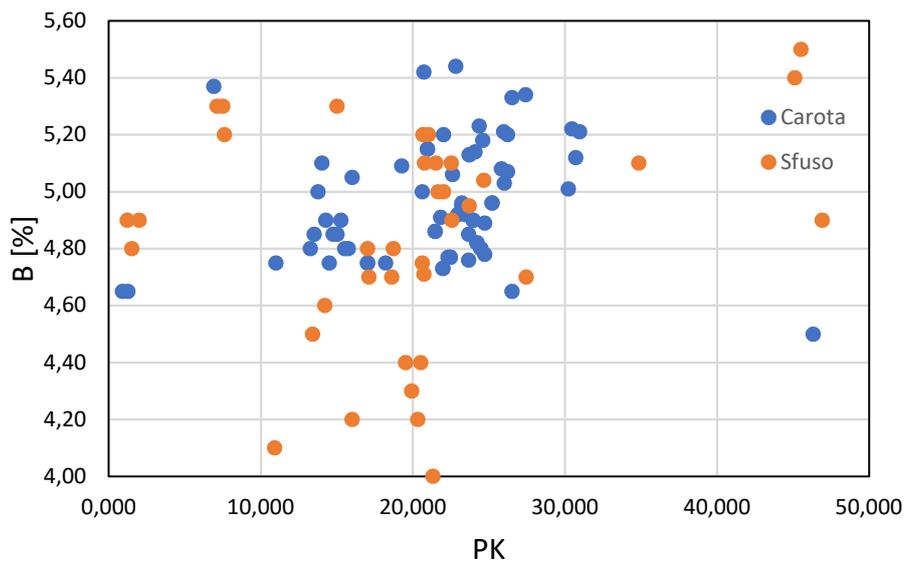


grafico 3: B [%] - PK (0-60 Km)

Percentuale di bitume B [%] - Progressiva chilometrica (90- 140km)

Nessun trend individuabile pochi dati carote.

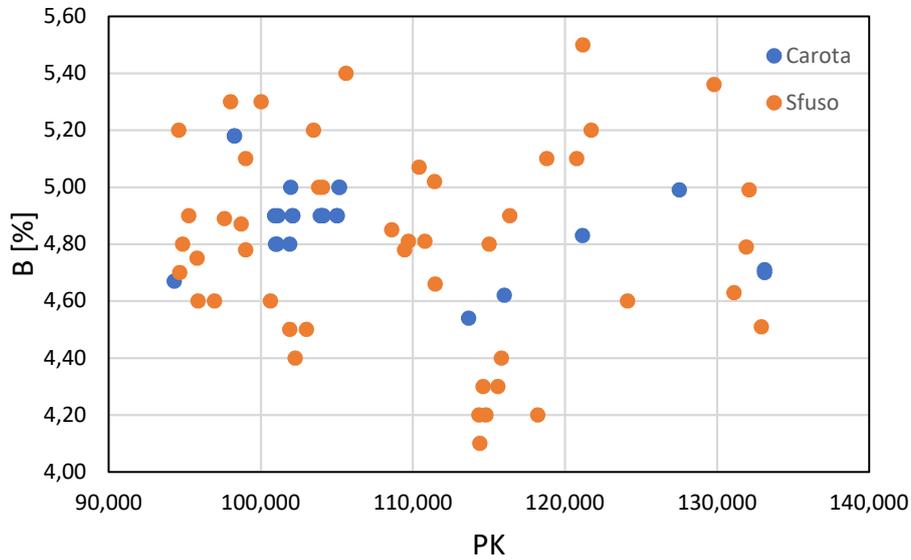


grafico 4: B [%] - PK (0-50 Km)

5.1.3 Grafici Base

Percentuale di bitume B [%] - Progressiva chilometrica (0- 60km)

La percentuale di bitume nella carota risulta maggiore di quello presente nello sfuso.

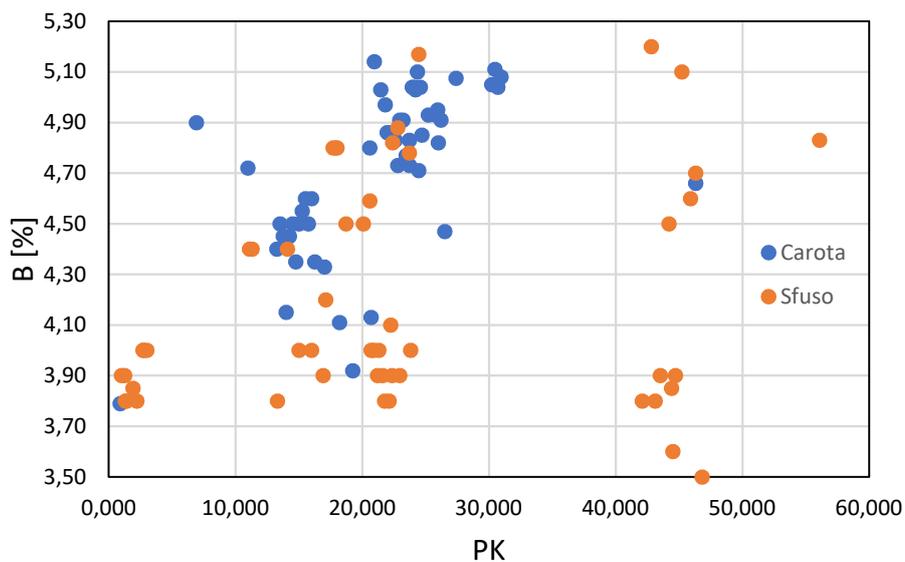


grafico 5: B [%] - PK (0-60 Km)

Percentuale di bitume B [%] - Progressiva chilometrica (90- 140km)

Nessun trend individuabile pochi dati.

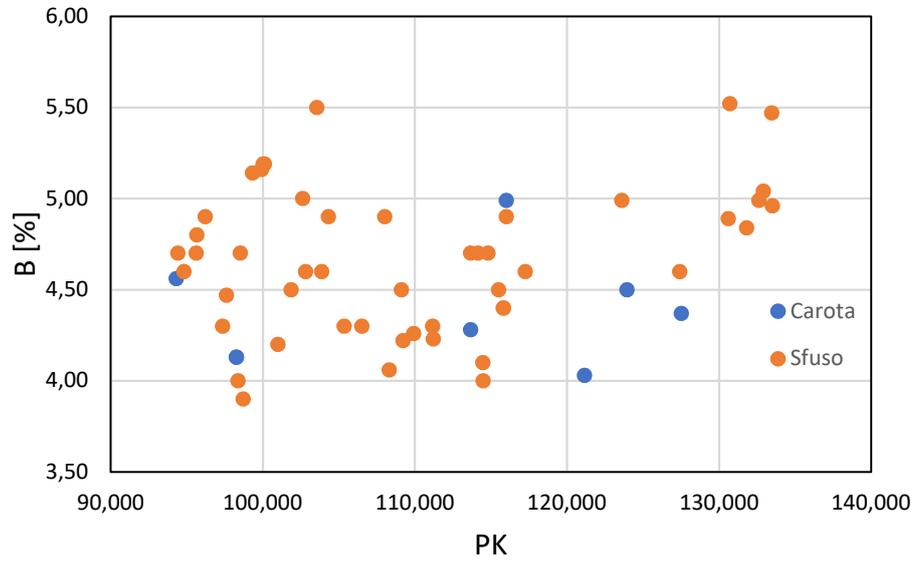


grafico 6: B [%] - PK (90 - 140 Km)

5.2 Percentuale di vuoti su progressiva chilometrica

5.2.1 Grafici Usura

Percentuali di Vuoti Vm [%] – Progressiva chilometrica (0-50Km)

La percentuale dei vuoti nella carota risulta maggiore di quello presente nello sfuso. Il volume dei vuoti dello sfuso considerato è il Vm_N2.

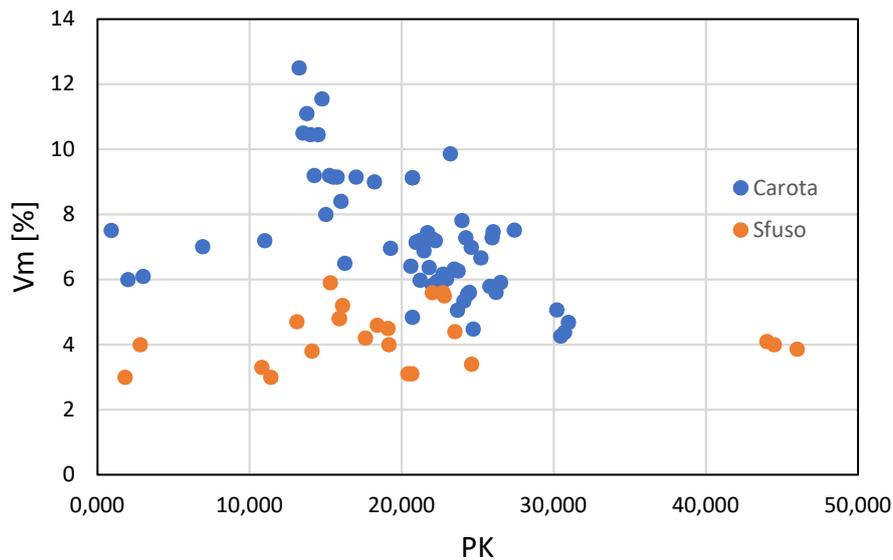


grafico 7: Vm [%] – PK (0-50 Km)

Percentuali di Vuoti Vm [%] – Progressiva chilometrica (90-140Km)

La percentuale dei vuoti nella carota risulta maggiore di quello presente nello sfuso. Il volume dei vuoti dello sfuso considerato è il Vm_N2.

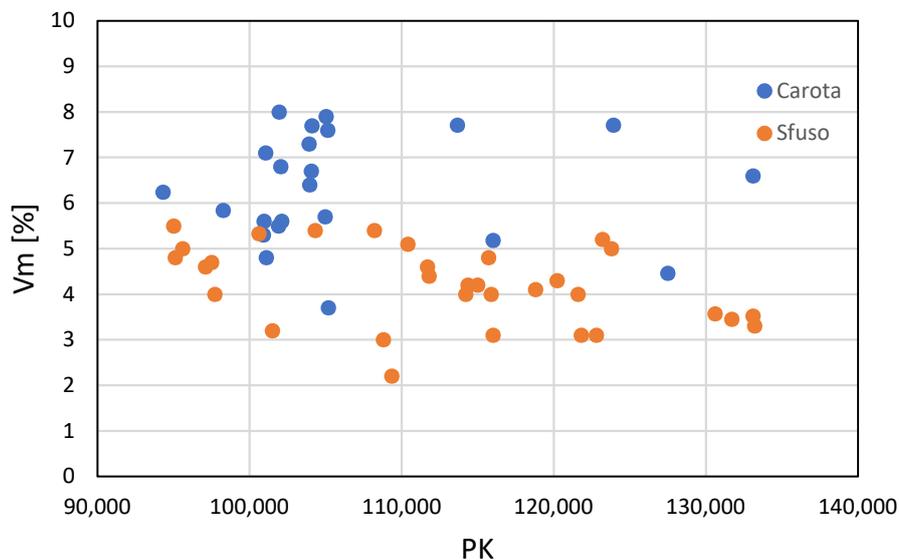


grafico 8: Vm [%] – PK (0-50 Km)

5.2.2 Grafici Binder

Percentuali di Vuoti Vm [%] - Progressiva chilometrica (0-50Km)

La percentuale dei vuoti nella carota risulta maggiore di quello presente nello sfuso. Il volume dei vuoti dello sfuso considerato è il Vm_N2.

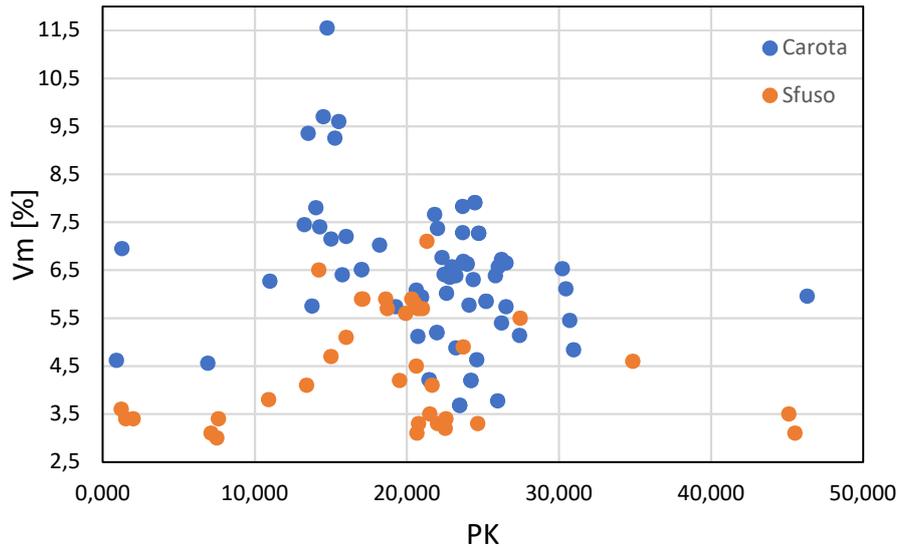


grafico 9: Vm [%] - PK (0-50 Km)

Percentuali di Vuoti Vm [%] - Progressiva chilometrica (90-140Km)

Nessun trend individuabile. Il volume dei vuoti dello sfuso considerato è il Vm_N2.

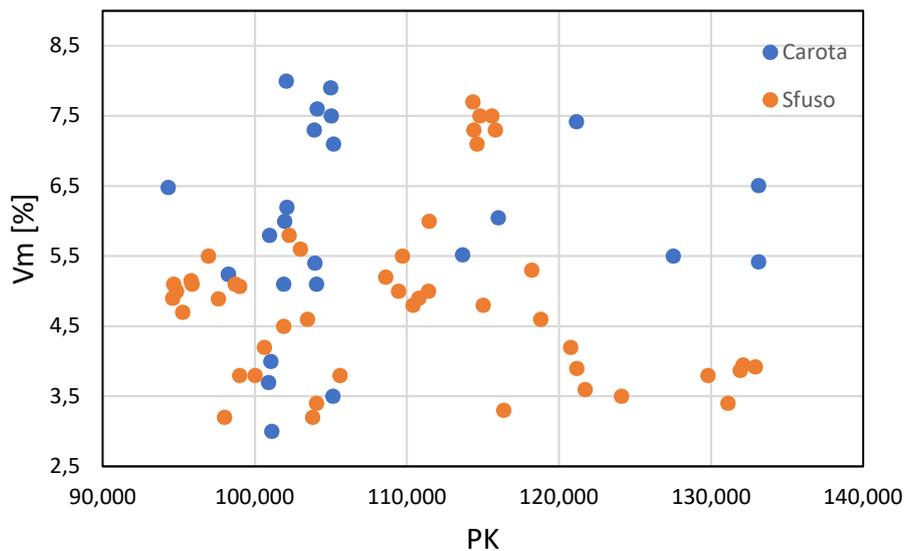


grafico 10: Vm [%] - PK (90-140 Km)

5.2.3 Grafici Base

Percentuali di Vuoti Vm [%] - Progressiva chilometrica (0-60Km)

La percentuale dei vuoti nella carota risulta maggiore di quello presente nello sfuso. Il volume dei vuoti dello sfuso considerato è il Vm_N2.

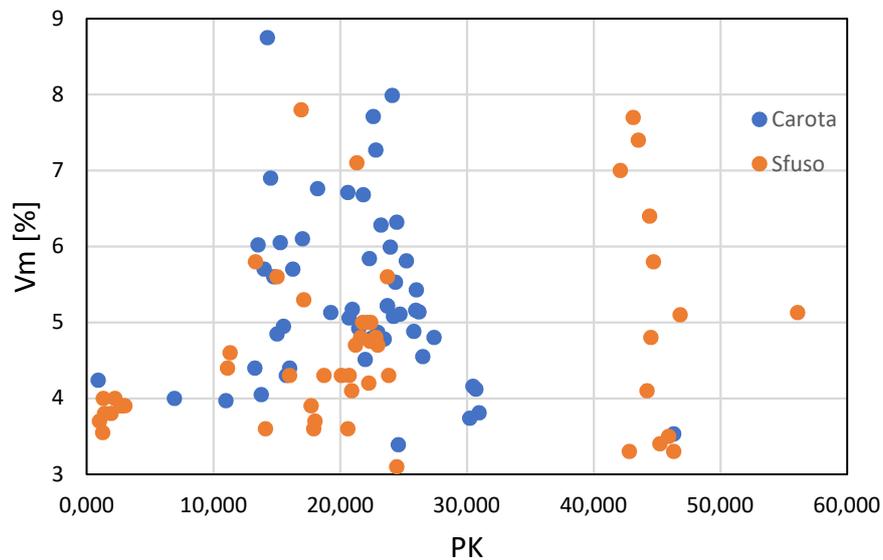


grafico 11: Vm [%] - PK (0-60 Km)

Percentuali di Vuoti Vm [%] - Progressiva chilometrica (90-140Km)

Nessun trend individuabile a causa dei pochi dati carote. Il volume dei vuoti dello sfuso considerato è il Vm_N2.

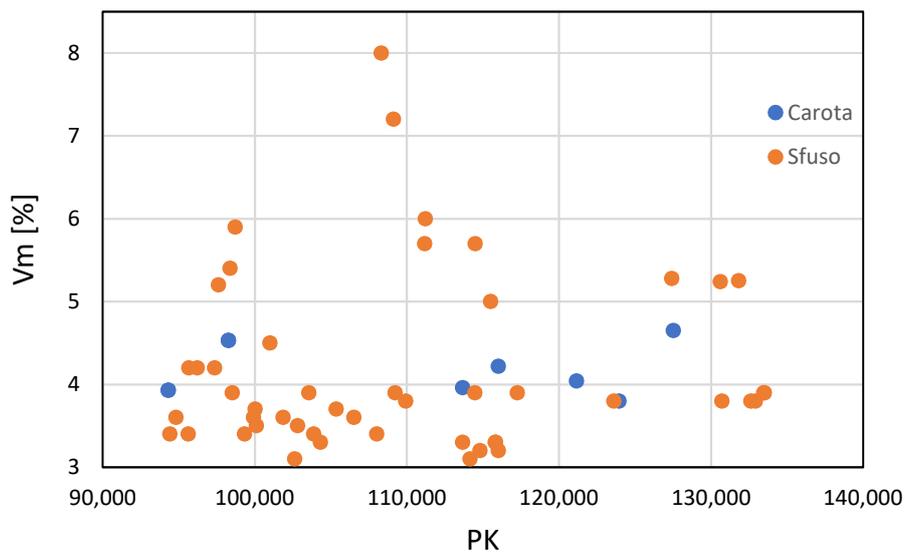


grafico 12: Vm [%] - PK (90-140 Km)

5.3 Percentuali di vuoti su percentuale di bitume (Carota)

5.3.1 Grafico Usura

Percentuali di Vuoti Vm [%] - Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile

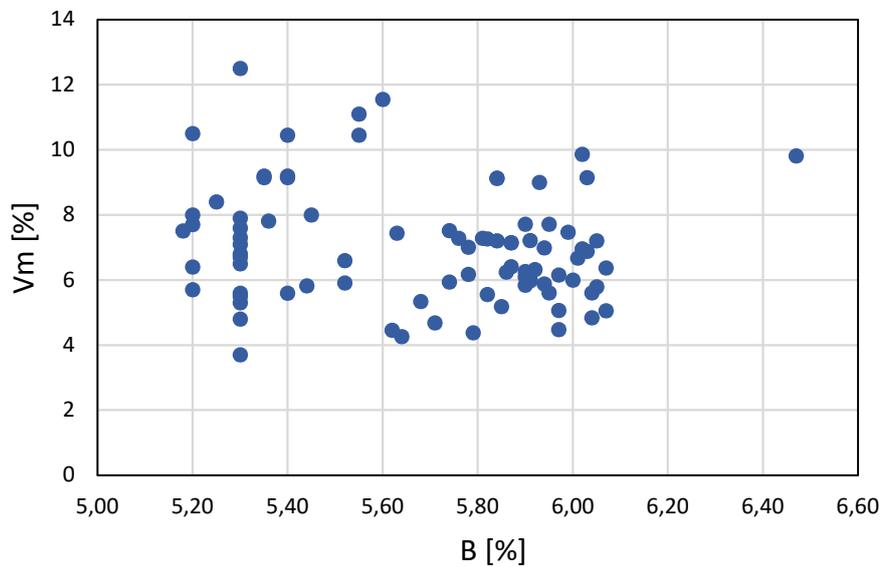


Grafico 13: Vm [%] – B [%]

5.3.2 Grafico Binder

Percentuali di Vuoti Vm[%] - Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile

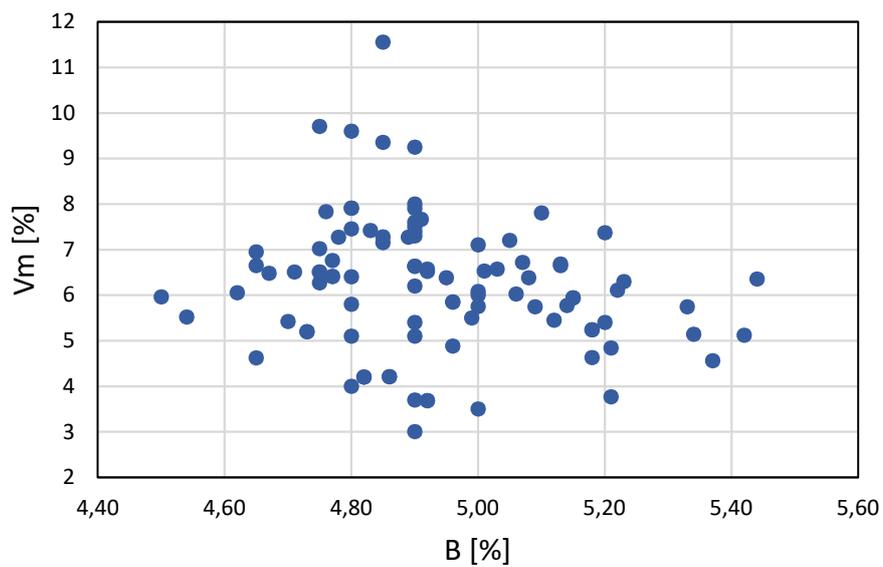


grafico 14: Vm [%] - B [%]

5.2.3.1 Grafici Base

Percentuali di Vuoti V_m [%] - Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile

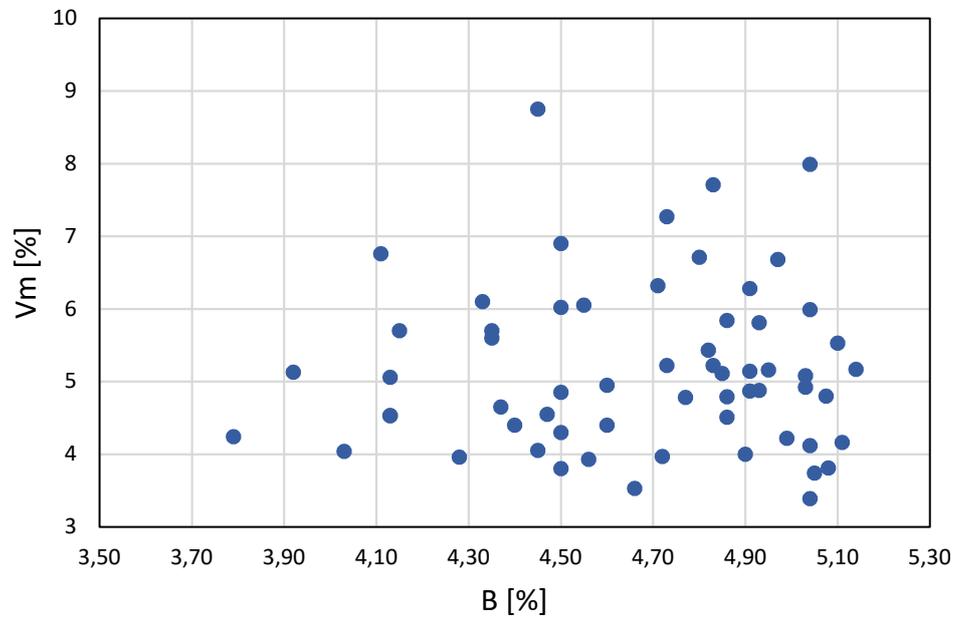


Grafico 15: V_m [%] – B [%]

5.4 Percentuali di vuoti su percentuale di bitume (Sfuso)

5.4.1 Grafici Usura

Percentuali di Vuoti Vm_N1 [%] - Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile

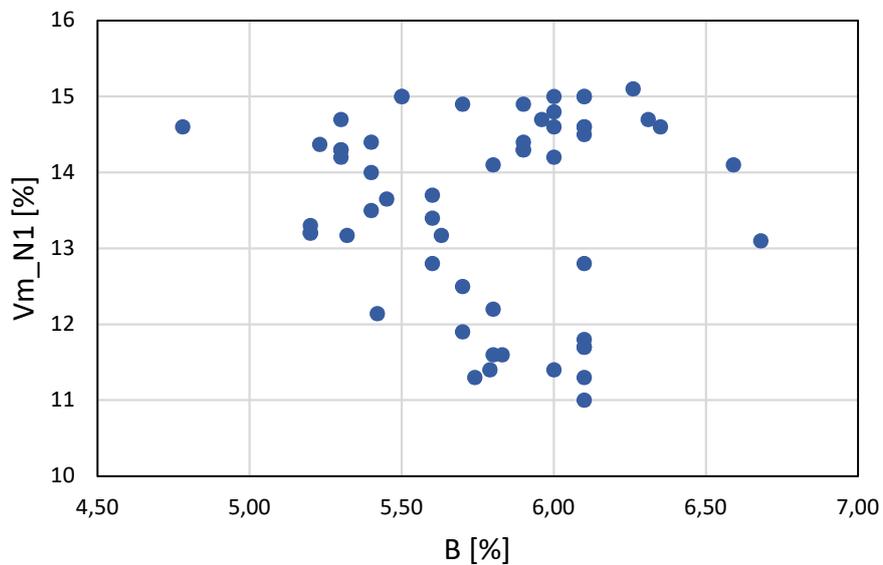


Grafico 16: Vm_N1 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale di bitume B [%]

I valori si concentrano nell'intervallo di percentuale di vuoti tra il 3 e 5 %

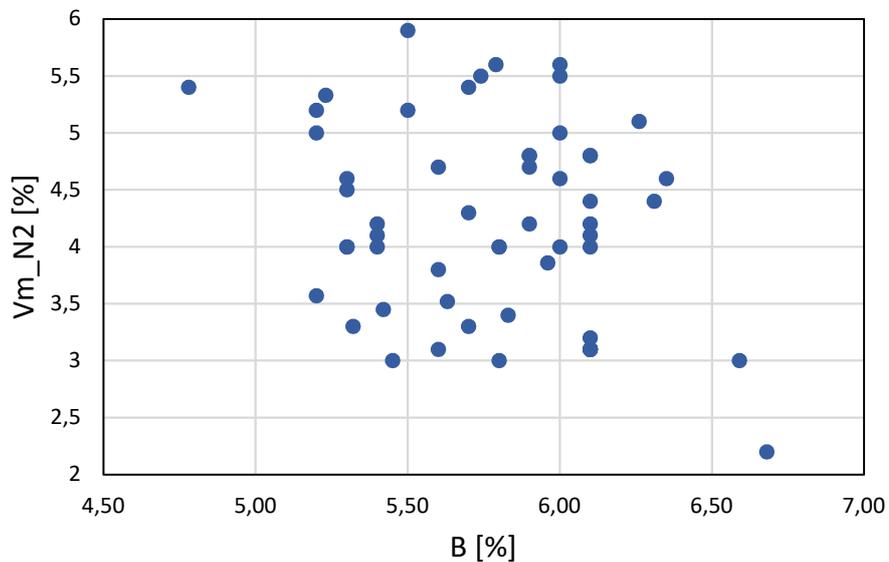


Grafico 17: Vm_N2 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N3 [%] - Percentuale di bitume B[%]

I valori si concentrano nell'intervallo tra il 3 e 4 % di vuoti e 5 e 6 % di bitume

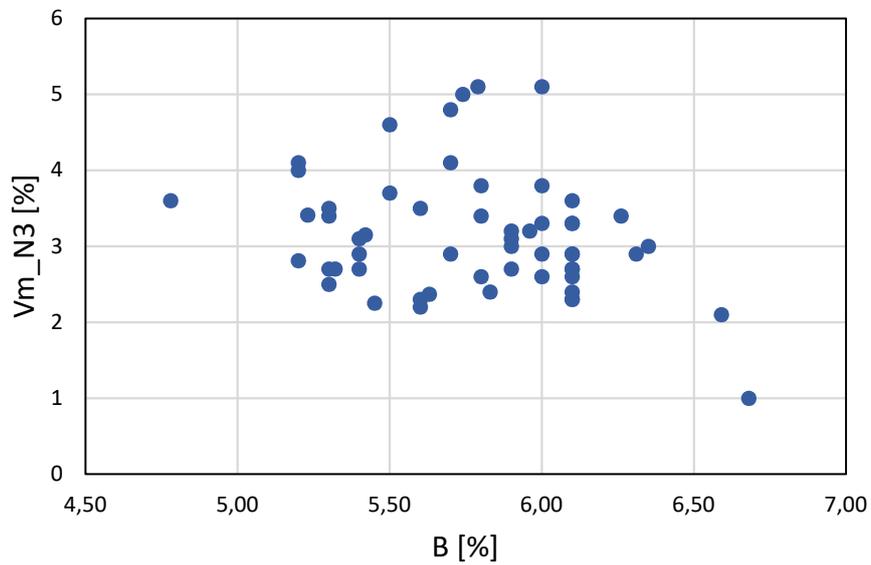


Grafico 18: Vm_N3 [%] – B [%]

5.4.2 Grafici Binder

Percentuali di Vuoti Vm_N1 [%] - Percentuale di bitume B [%]

Aumentando la percentuale di bitume la percentuale dei vuoti diminuisce

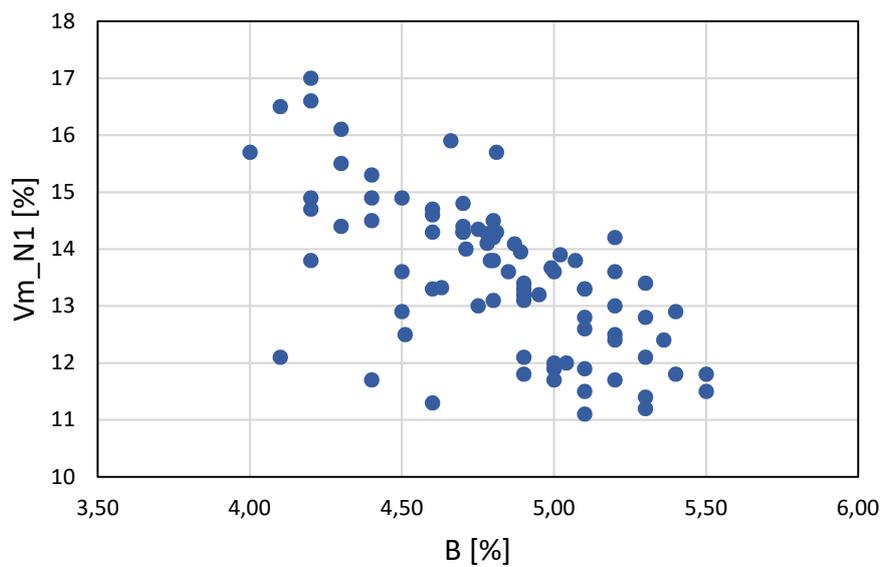


grafico 19: Vm_N1 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] - Percentuale di bitume B [%]

Aumentando la percentuale di bitume la percentuale dei vuoti diminuisce

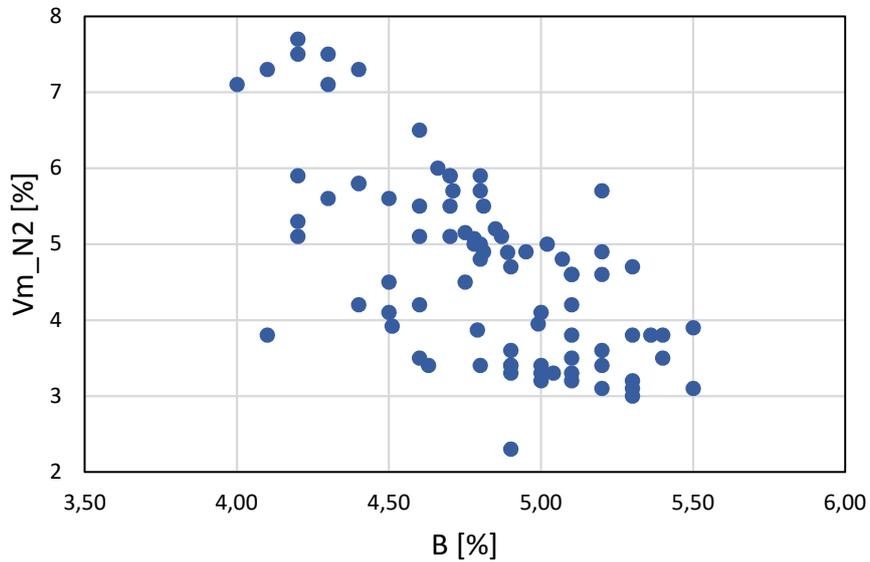


grafico 20: Vm_N2 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N3 [%] - Percentuale di bitume B [%]

Aumentando la percentuale di bitume la percentuale dei vuoti diminuisce

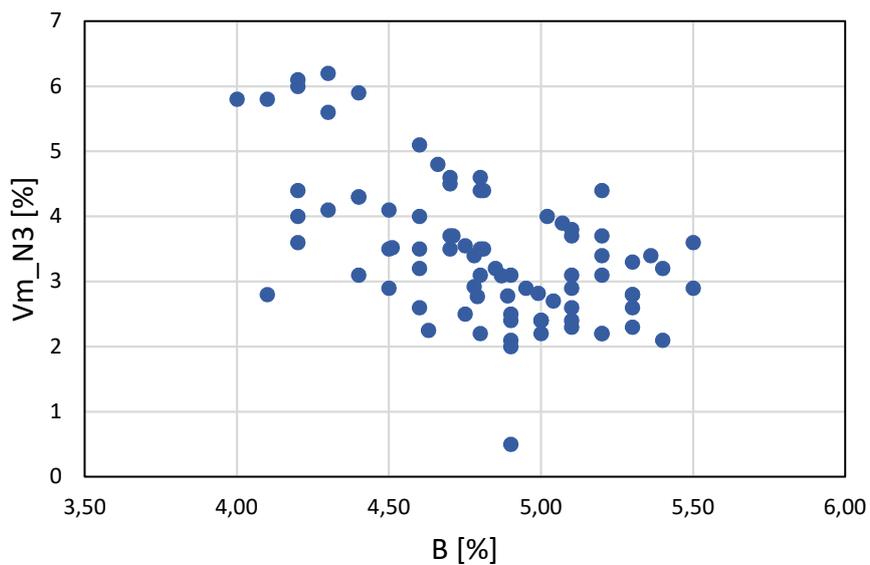


grafico 21: Vm_N3 [%] – B [%]

5.4.3 Grafici Base

Percentuali di Vuoti Vm_N1 [%] - Percentuale di bitume B [%]

Aumentando la percentuale di bitume la percentuale dei vuoti diminuisce

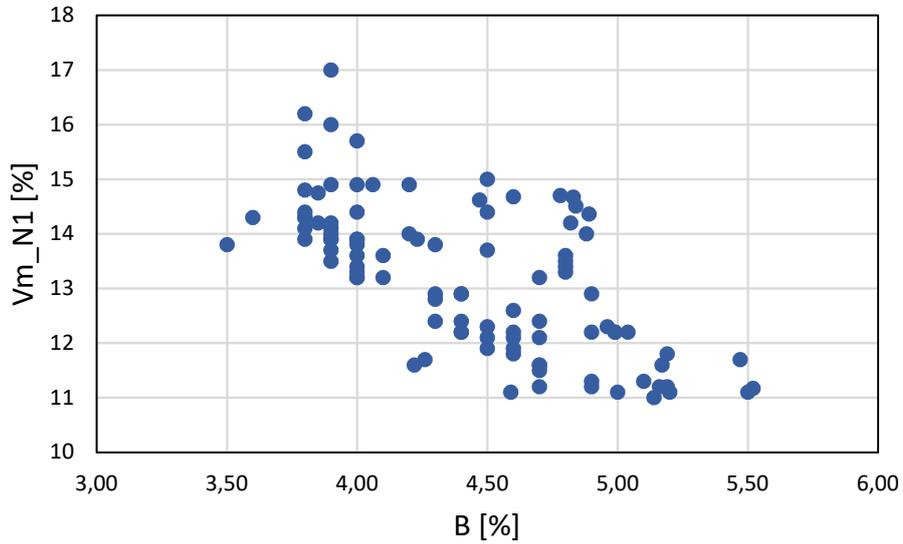


Grafico 22: Vm_N1 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] - Percentuale di bitume B [%]

Aumentando la percentuale di bitume la percentuale dei vuoti diminuisce

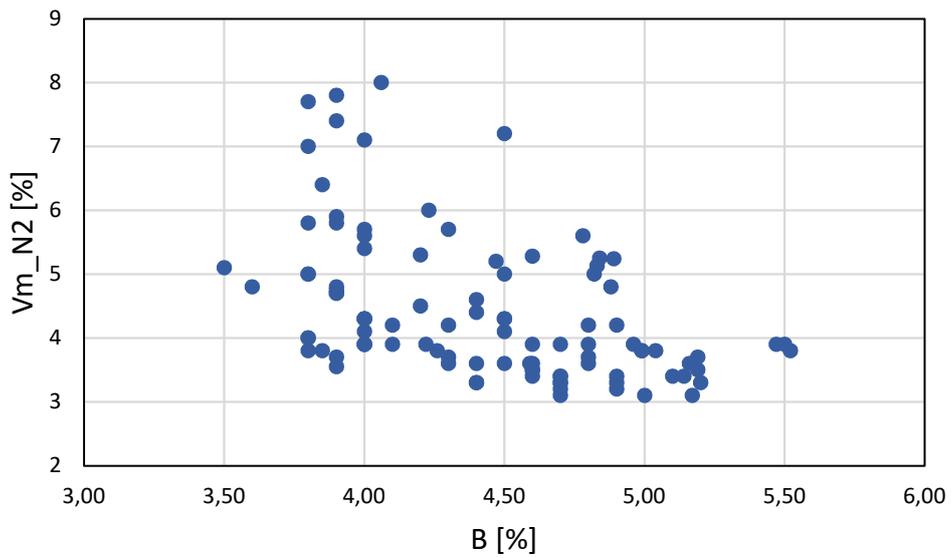
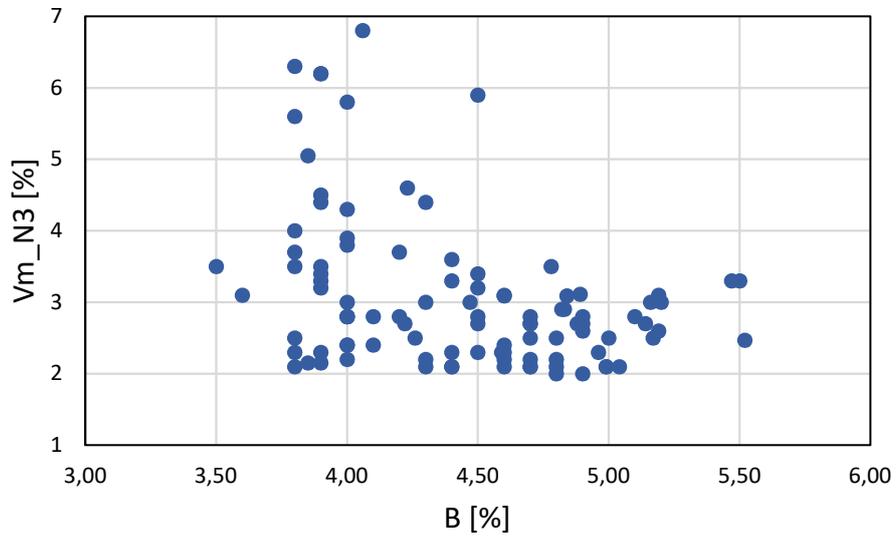


Grafico 23: Vm_N2 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti V_m_{N3} [%] - Percentuale di bitume B [%]

Aumentando la percentuale di bitume la percentuale dei vuoti diminuisce



5.5 Percentuale di vuoti su percentuale passante (Sfuso)

5.5.1 Grafici Usura

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 8mm [%]

I valori si concentrano nell'intervallo tra il 3 e 5 % di vuoti e tra l' 80 e 85 % di passante a 8 mm.

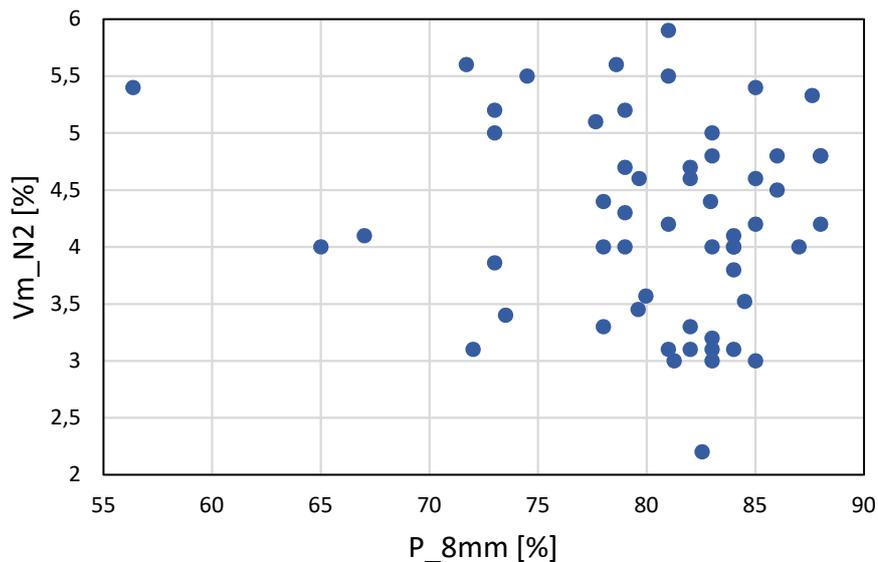


Grafico 25: Vm_N2 [%] - P_8mm [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 2 mm

I valori si concentrano nell'intervallo tra il 3 e 6 % di vuoti e tra il 30 e 40 % di passante a 2 mm.

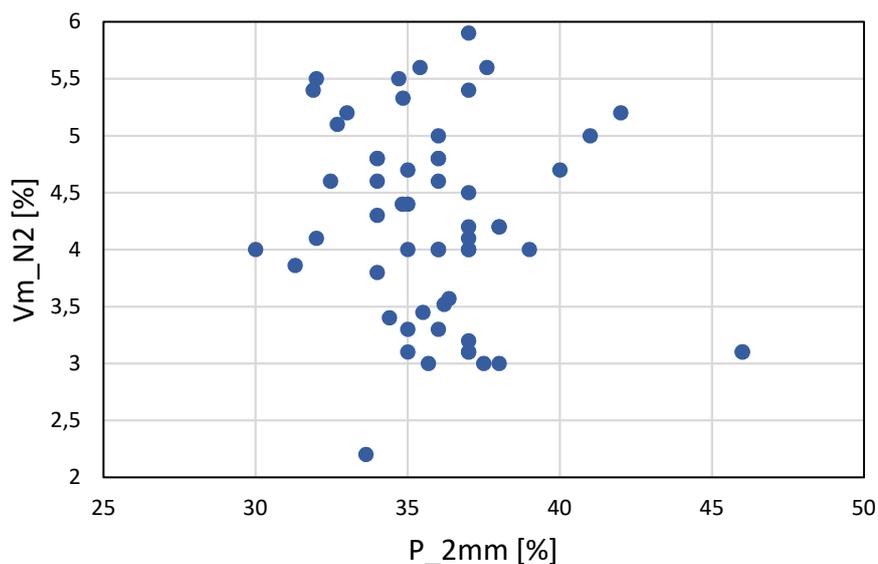


Grafico 26: Vm_N2 [%] - P_2mm [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 0.063 mm

I valori si concentrano nell'intervallo tra il 3 e 6 % di vuoti e tra il 6 e 10 % di passante a 2 mm. I valori con percentuale di passante minore del 4 % non sono attendibili perché provenienti dallo stesso impianto.

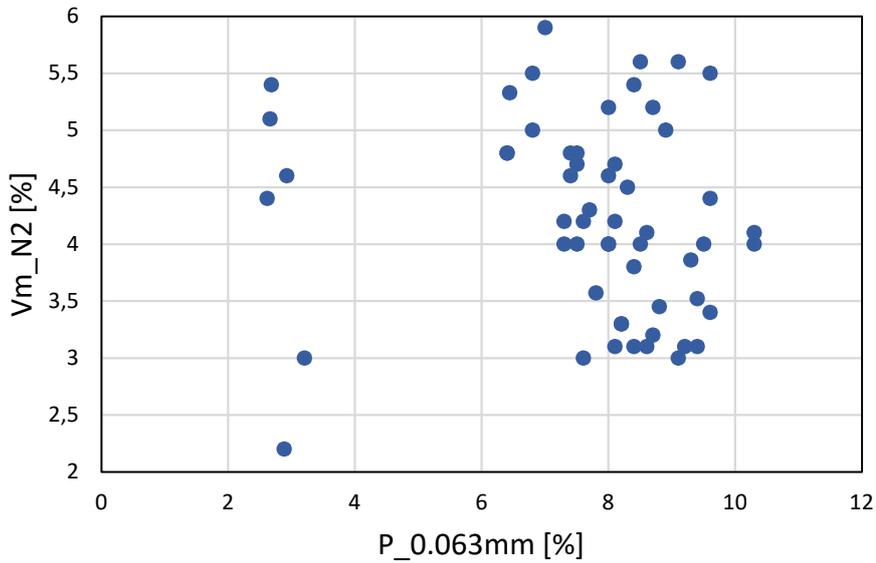


Grafico 27: Vm_N2[%] - P_0.063mm [%]

5.5.2 Grafici Binder

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 8mm

I valori si concentrano tra il 3 e 5 % di vuoti con una percentuale di passante tra il 60 e 70 %

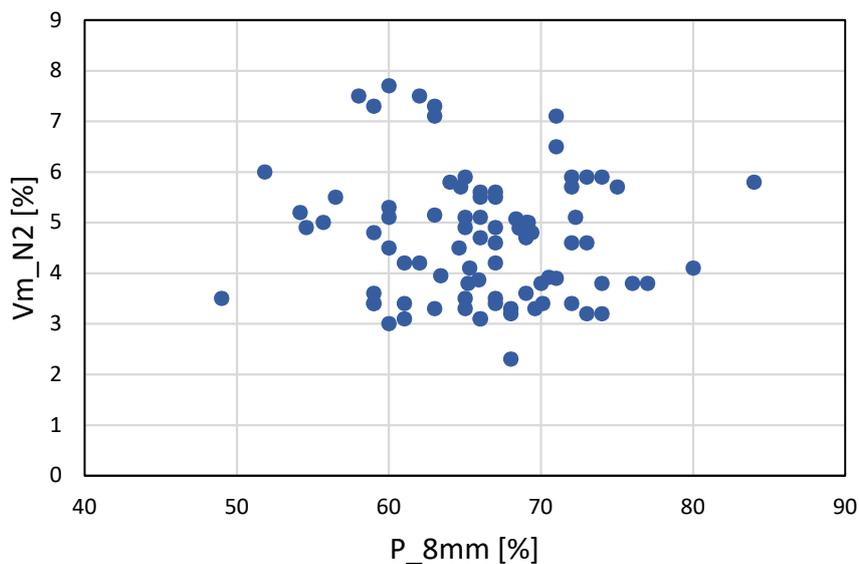


grafico 28: Vm_N3 [%] – B [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 2 mm

Nessun trend individuabile

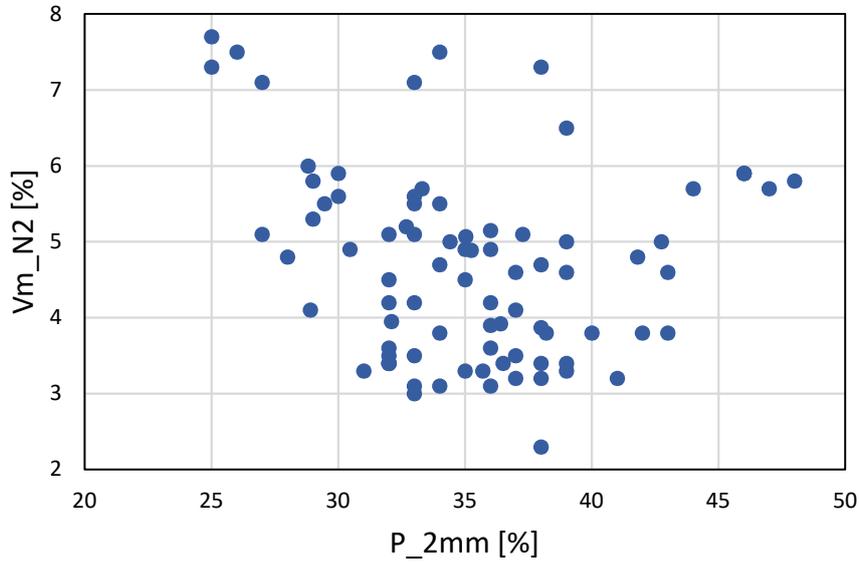


grafico 29: Vm_N2 [%] - P_2mm [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 0.063 mm

Maggiore è la percentuale di passante minore è la quantità di vuoti

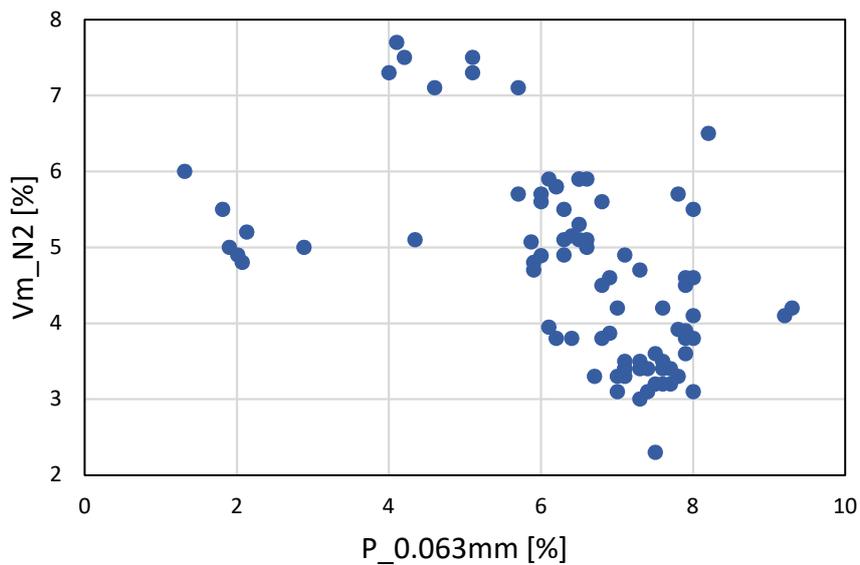


grafico 30: Vm_N2 [%] - P_0.063mm [%]

5.5.3 Grafici Base

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 8mm

Nessun trend individuabile.

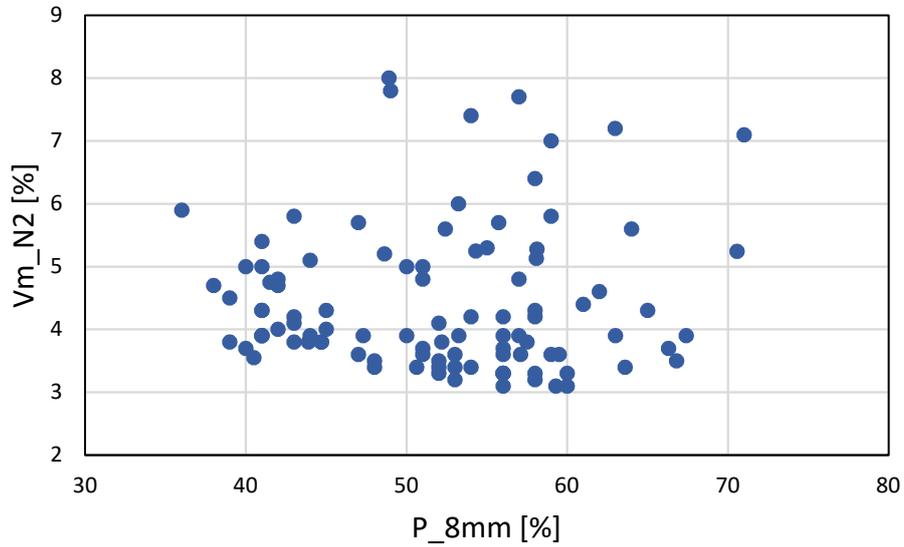


Grafico 31: Vm_N2 [%] - P_8mm [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 2 mm

Maggiore è la percentuale di passante minore è la quantità di vuoti.

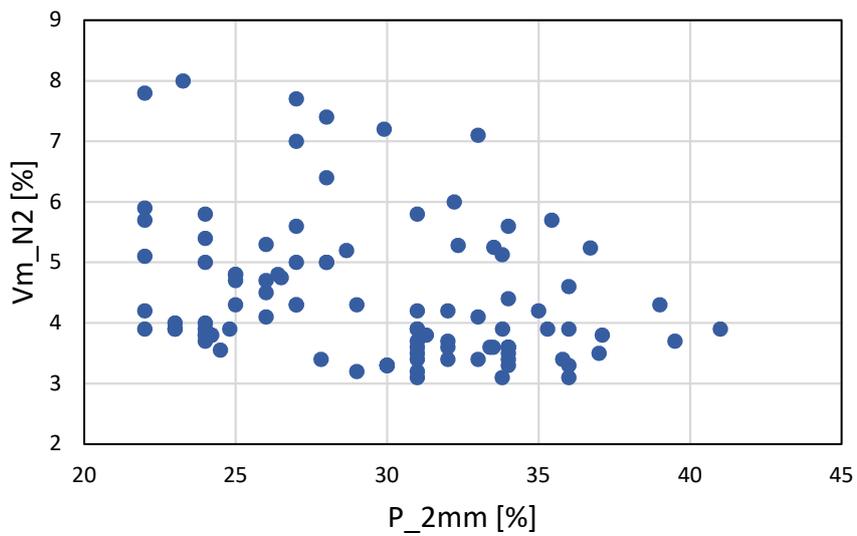


Grafico 32: Vm_N2 [%] - P_2mm [%]

Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%] – Percentuale passante 0.063 mm

Maggiore è la percentuale di passante minore è la quantità di vuoti.

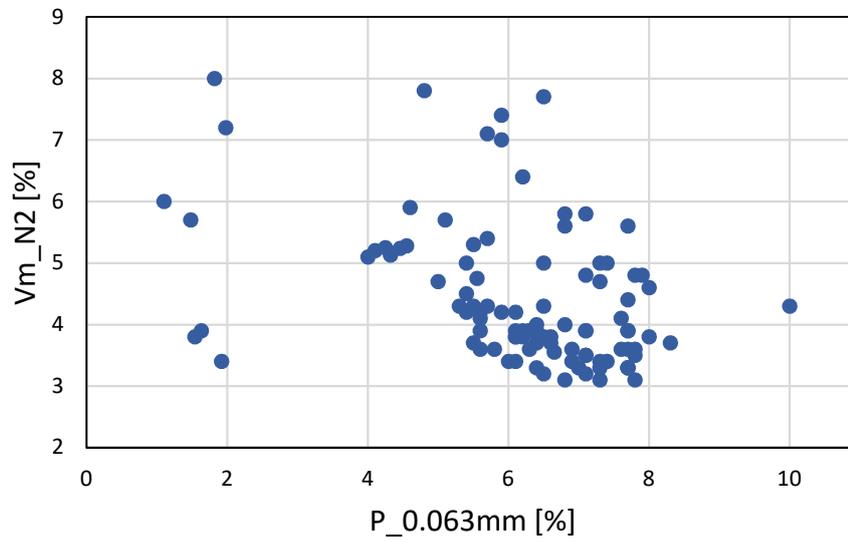


Grafico 33: Vm_N2 [%] - P_0.063mm [%]

5.6 Resistenza a trazione indiretta su percentuale di vuoti (Sfuso)

5.6.1 Grafici Usura

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] - Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%]

Nessun trend individuabile.

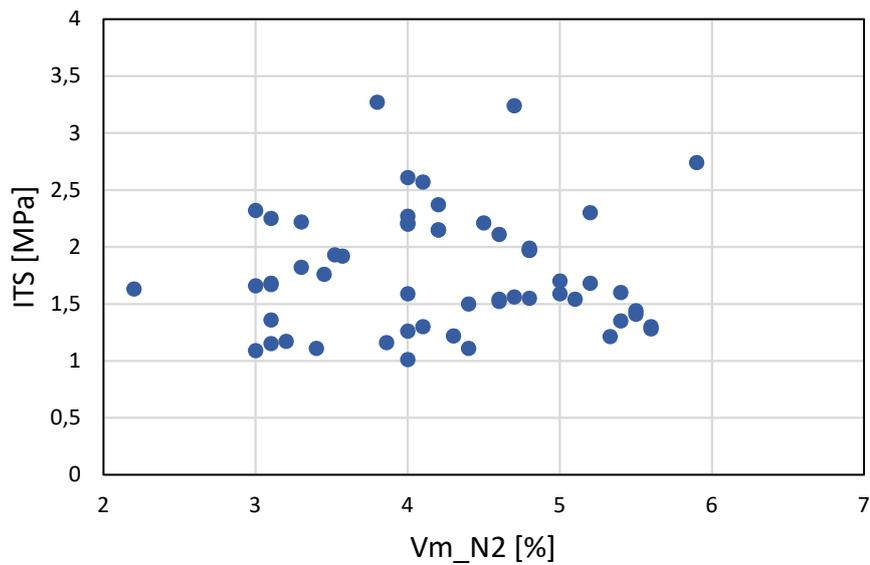


Grafico 34: ITS [MPa] - Vm_N2 [%]

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] - Percentuali di Vuoti Vm_N3 [%]

Aumentando la percentuale dei vuoti la resistenza a trazione indiretta diminuisce.

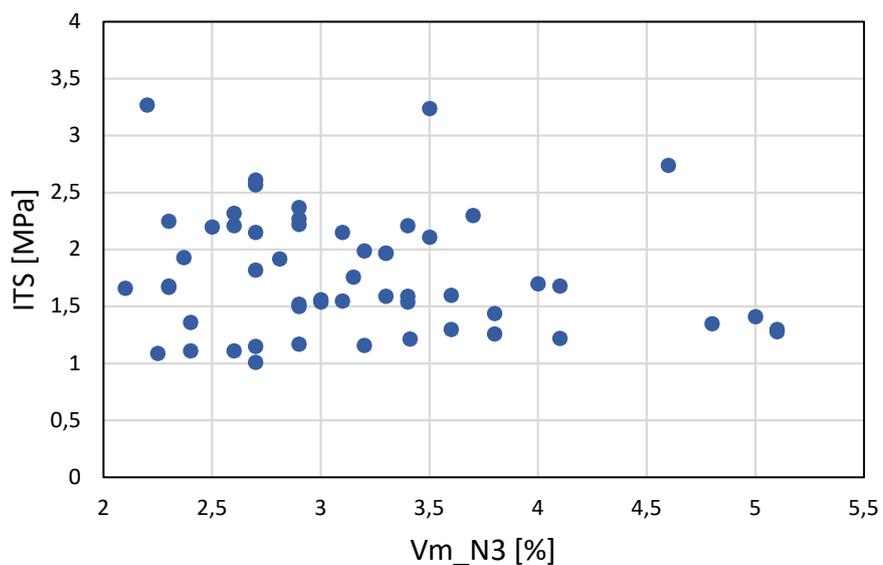


Grafico 35: ITS [MPa] - Vm_N3[%]

5.6.2 Grafici Binder

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] - Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%]

Nessun trend individuabile.

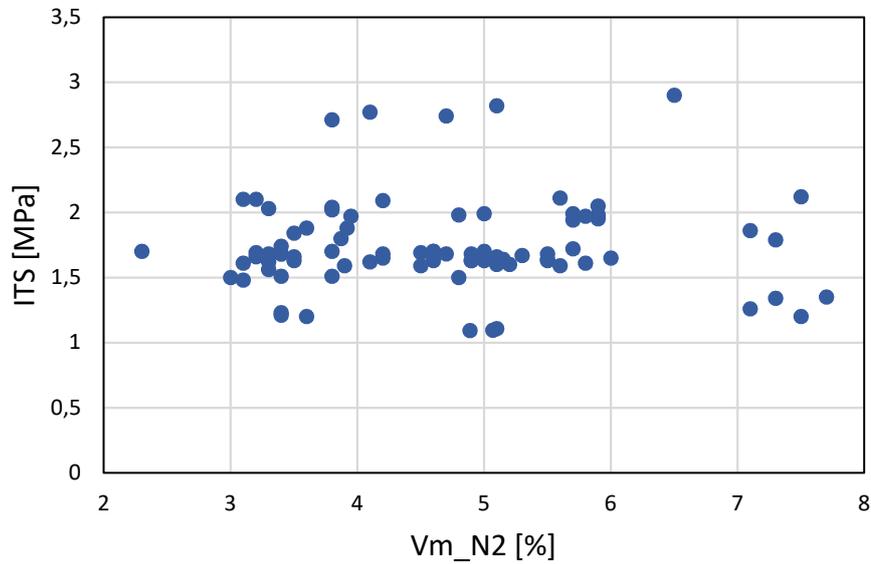


Grafico 36: ITS [MPa] - Vm_N2 [%]

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] - Percentuali di Vuoti Vm_N3 [%]

Nessun trend individuabile.

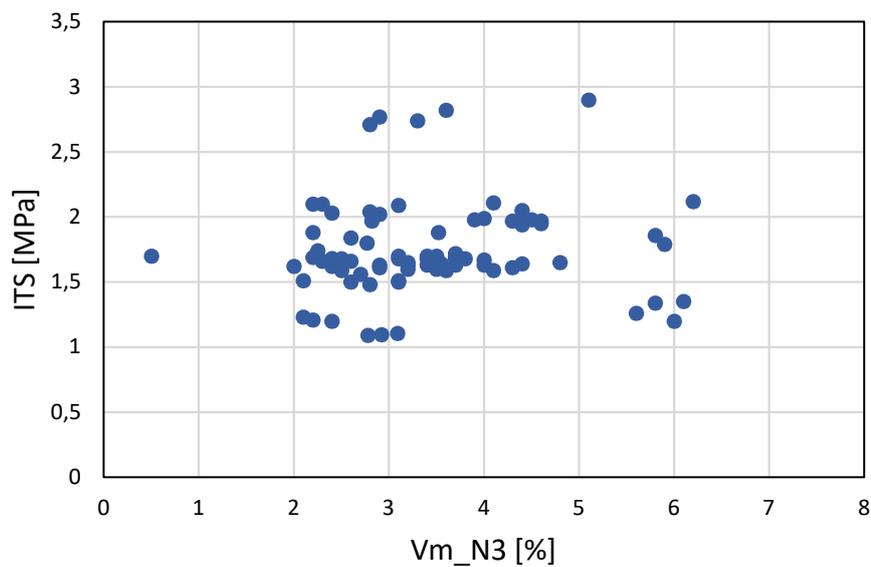


Grafico 37: ITS [MPa] - Vm_N3 [%]

5.6.3 Grafici Base

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] - Percentuali di Vuoti Vm_N2 [%]

Diminuendo la percentuale dei vuoti la resistenza a trazione indiretta aumenta.

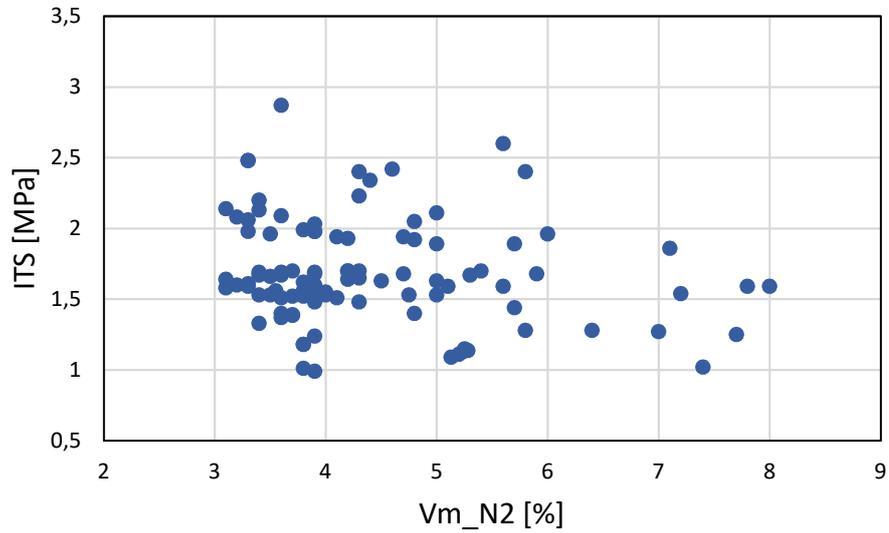


Grafico 38: ITS [MPa] - Vm_N2 [%]

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] - Percentuali di Vuoti Vm_N3 [%]

Diminuendo la percentuale dei vuoti la resistenza a trazione indiretta aumenta.

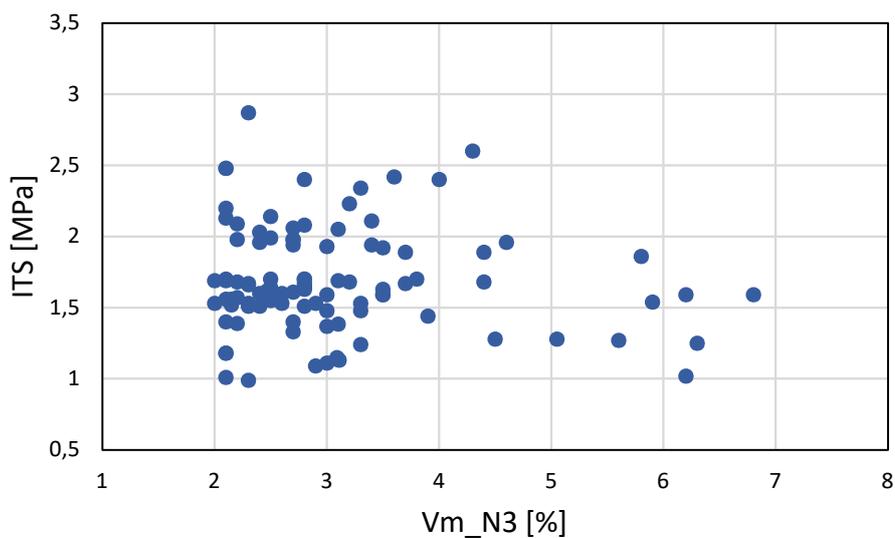


Grafico 39: ITS [MPa] - Vm_N3 [%]

5.7 Resistenza a trazione indiretta su percentuale passante (Sfuso)

5.7.1 Grafico Usura

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale passante 0.063 mm

Nessun trend individuabile. I valori con percentuale di passante minore del 4 % non sono attendibili perché provenienti dallo stesso impianto.

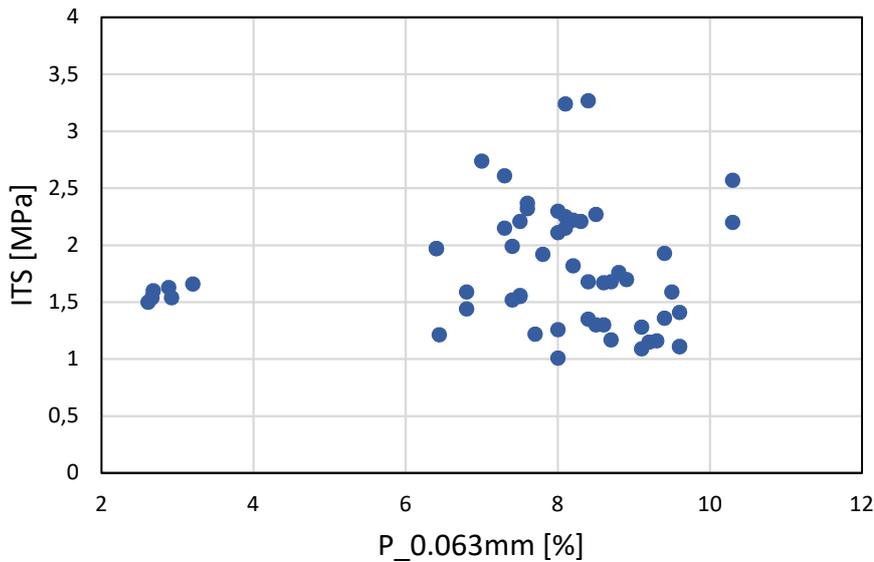


Grafico 40: ITS [MPa] - P_0.063mm [%]

5.7.2 Grafico Binder

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale passante 0.063 mm

Nessun trend individuabile.

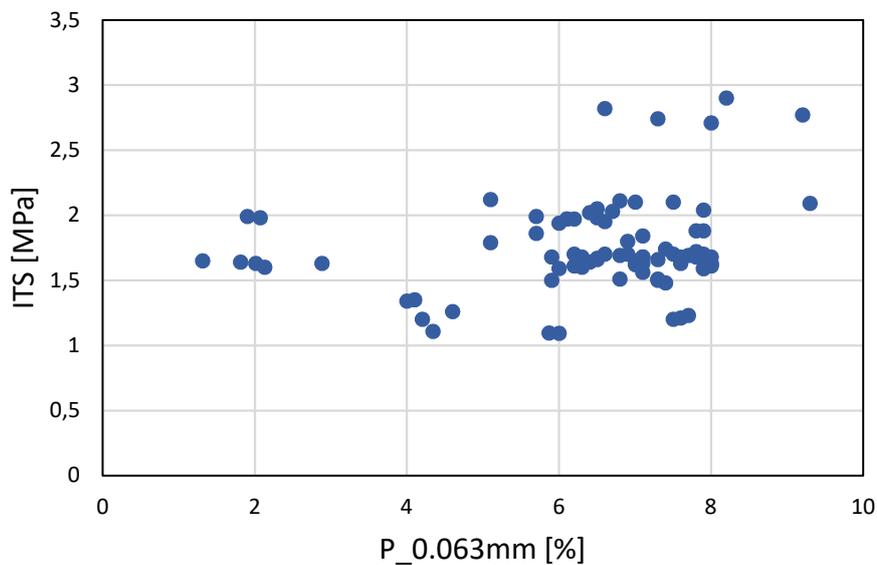


Grafico 41: ITS [MPa] - P_0.063mm [%]

5.7.3 Grafico Base

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale passante 0.063 mm

Aumentando la percentuale di passante al setaccio 0.063 mm la resistenza a trazione indiretta aumenta.

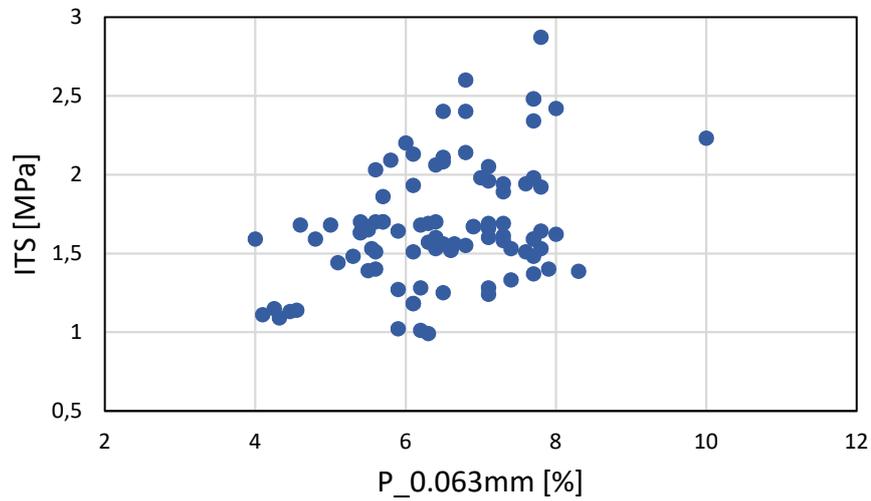


Grafico 42: ITS [MPa] - P_0.063mm [%]

5.8 Resistenza a trazione indiretta su percentuale di bitume (Sfuso)

5.8.1 Grafico Usura

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile.

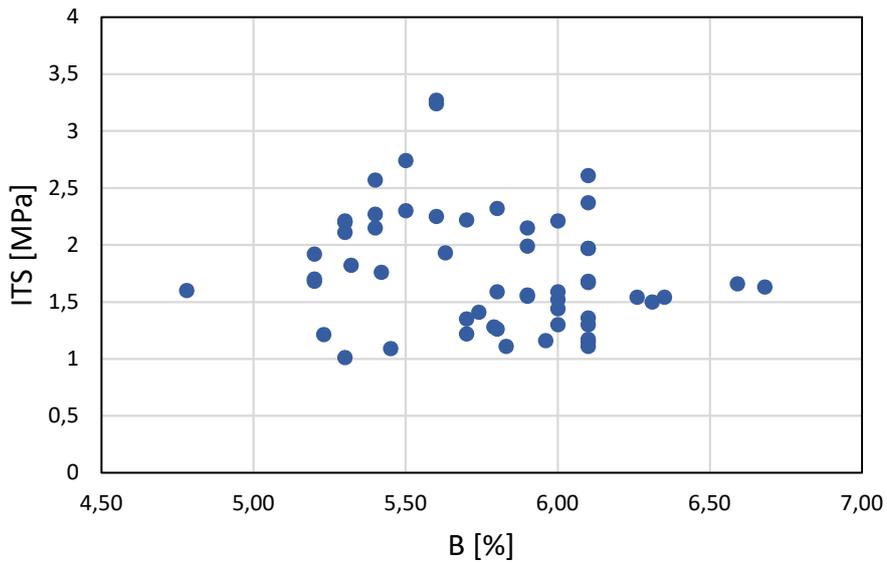


Grafico 43: ITS [MPa] - B [%]

5.8.2 Grafico Binder

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile.

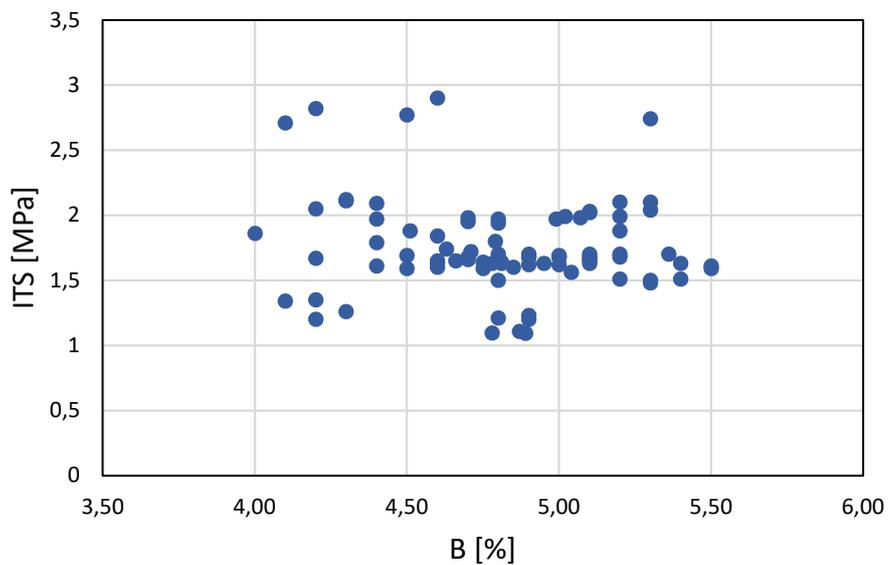


Grafico 44: ITS [MPa] - B [%]

5.8.3 Grafico Base

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale di bitume B [%]

Nessun trend individuabile.

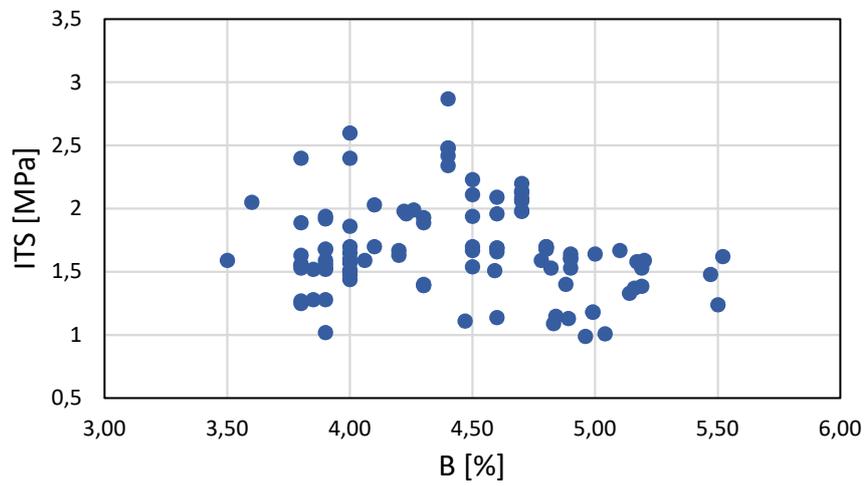


Grafico 45: ITS [MPa] - B [%]

5.9 Resistenza a trazione indiretta su percentuale di bitume diviso percentuale passante (sfuso)

5.9.1 Grafico Usura

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale di B [%] / P_0.063 mm

I valori si concentrano nell'intervallo tra l' 1 ed il 3,5 % di ITS e 0,5 e 1 % di bitume / passante al 0.063 mm. I valori con percentuale di passante maggiore del 1,5 % non sono attendibili perché provenienti dallo stesso impianto.

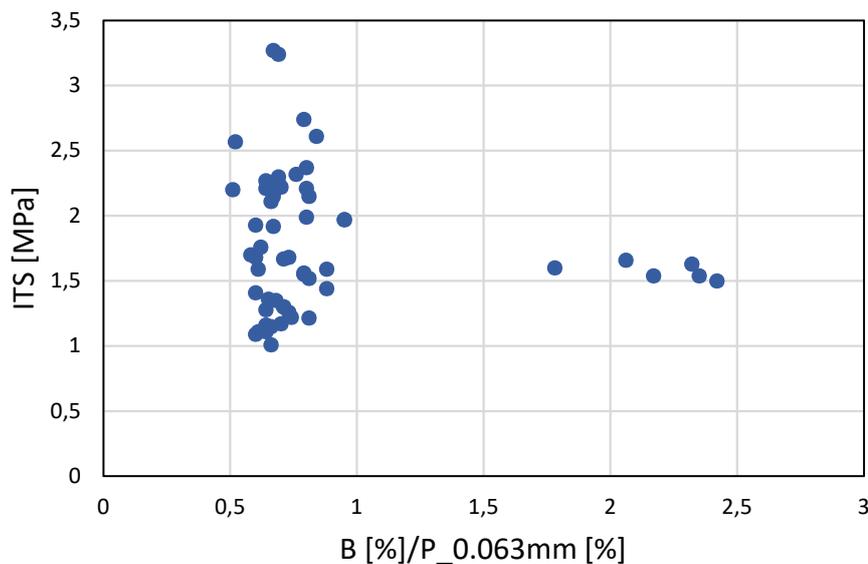


Grafico 46: ITS [MPa] - B[%] / P_0.063mm

5.9.2 Grafico Binder

Resistenza trazione indiretta ITS [MPa] – Percentuale

B [%] / P_0.063mm

La resistenza a trazione indiretta diminuisce al cresce del rapporto B/P0.063. I punti con B/P0.063 maggiore di 1.5 vanno esclusi dall'analisi poiché vengono tutti dallo stesso laboratorio quindi poco attendibili.

5.10 Coefficiente di trazione indiretta su percentuale di bitume diviso percentuale passante (Sfuso)

5.10.1 Grafico Usura

Coefficiente trazione indiretta CTI [Mpa] – Percentuale

B [%] / P_0.063 mm

I valori si concentrano nell'intervallo tra il 100 e 200 % di ITS e 0,5 e 1 % di bitume / passante al 0.063 mm. I valori con percentuale di passante maggiore del 1,5 % non sono attendibili perché provenienti dallo stesso impianto.

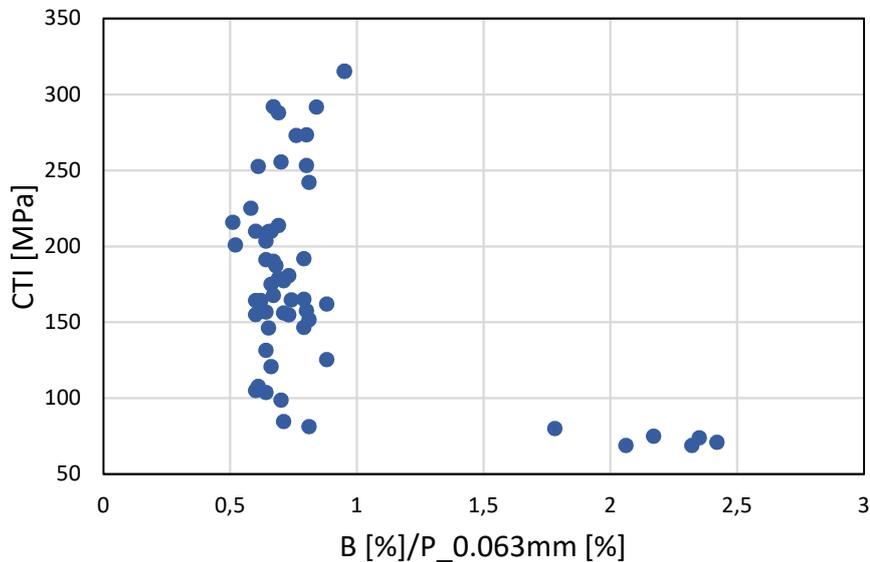


Grafico 49: CTI [Mpa] – B[%] / P_0.063mm

5.10.2 Grafico Binder

Coefficiente trazione indiretta CTI [MPa] – Percentuale

B[%] / P_0.063mm

Il coefficiente di trazione indiretta aumenta al cresce del rapporto B/P0.063. I punti con B/P0.063 maggiore di 1.5 vanno esclusi dall'analisi poiché vengono tutti dallo stesso laboratorio quindi poco attendibili.

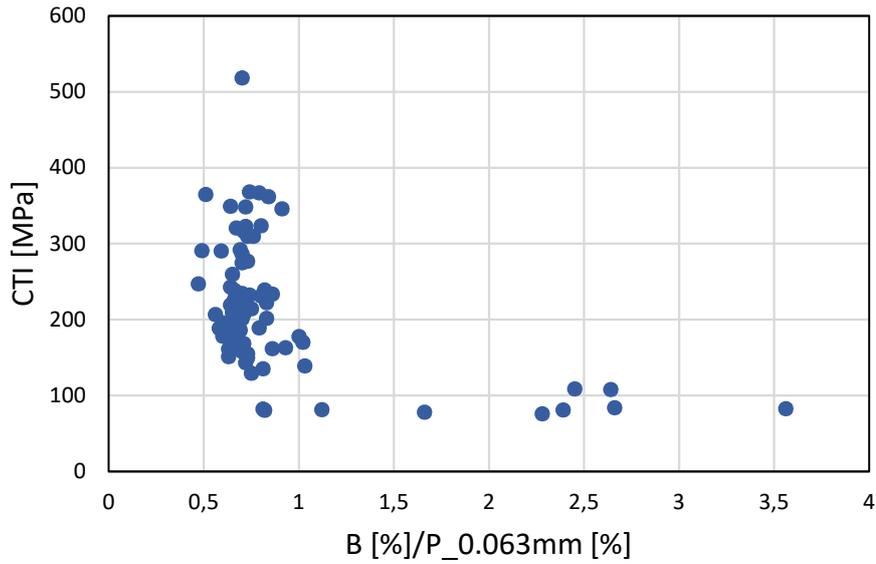


Grafico 50: CTI [MPa] – B [%] / P_0.063mm

5.10.3 Grafico Base

Coefficiente trazione indiretta CTI [MPa] – Percentuale

B[%] / P_0.063 mm

Il coefficiente di trazione indiretta aumenta al cresce del rapporto B/P0.063. I punti con B/P0.063 maggiore di 1.5 vanno esclusi dall'analisi poiché vengono tutti dallo stesso laboratorio quindi poco attendibili.

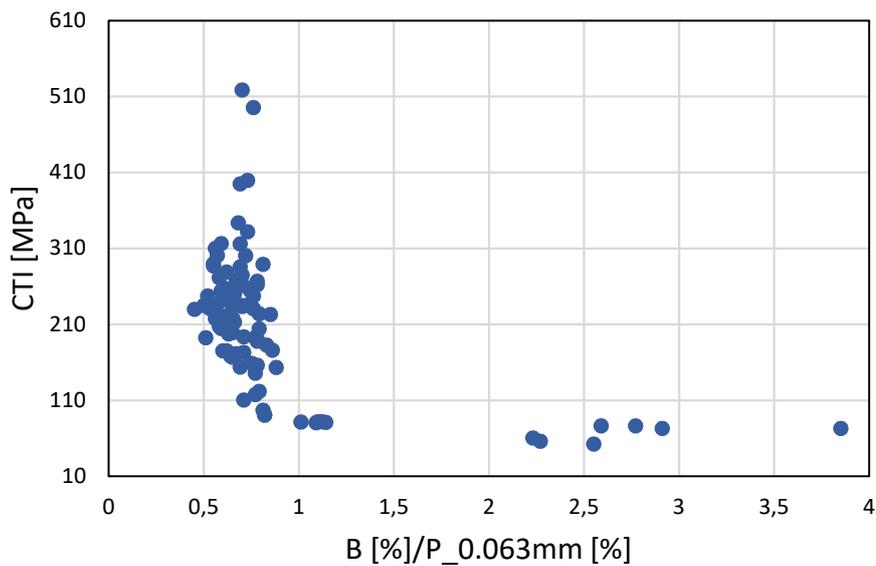


Grafico 51: CTI [MPa] – B [%] / P_0.063mm

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Nello studio trattato, sono state analizzate e confrontate le proprietà dei conglomerati bituminosi realizzati in impianti di produzione, sotto due aspetti:

- Nella fase solida, attraverso lo studio di carote prelevate in situ,
- Nella fase sfusa, attraverso lo studio di materiale sfuso prelevato durante la stesa in cantiere e poi utilizzato per la realizzazione di provini in laboratorio ed altro.

A tale scopo sono state studiate diverse caratteristiche:

Per il conglomerato in fase solida le caratteristiche prese in esame sono:

- Contenuto di bitume
- Percentuale dei Vuoti

Per la miscela sfusa, grazie ad un processo di compattazione nella pressa giratoria, è possibile ottenere dei provini i quali hanno permesso di studiare 4 proprietà del conglomerato:

- Contenuto di bitume
- Percentuale di vuoti
- Analisi granulometrica
- Resistenza a trazione indiretta

Concludendo, dopo aver analizzato tutti i grafici, è stato possibile arrivare alle seguenti conclusioni:

- ❖ La percentuale di passante al 2 % è significativa per la base, ma non per il binder;
- ❖ Aumentando la percentuale di passante al 0,063mm la percentuale di vuoti diminuisce. Questa situazione è valida per tutti gli strati;

- ❖ I vuoti diminuiscono all'aumentare del contenuto di bitume. Questa situazione non si verifica per le carote perché probabilmente nei vuoti delle carote entrano in gioco altri fattori come temperatura della miscela e precisione delle fasi di stesa come: velocità della vibrofinitrice, numero di passate di rullo, tipo di rullo (gommato, d'acciaio, tandem), peso del rullo, funzionamento del rullo (normale o con vibrazione);
- ❖ La percentuale dei vuoti nelle carote dello strato di usura è molto più variabile rispetto a quella degli strati di base e binder. Questo perché nello strato di usura è più facile avere problemi durante la fase di stesa;
- ❖ Nello sfuso dell'usura la percentuale di vuoti sembra essere indipendente dal contenuto di bitume e dalla percentuale di passante ai vari setacci. Questo perché l'assortimento granulometrico nel tappeto assume un ruolo molto più significativo. E' difficile individuare un trend chiaro a causa del sommarsi dell'influenza di percentuale di bitume e dalla granulometria;
- ❖ La resistenza a trazione indiretta aumenta al diminuire della percentuale dei vuoti. Questa situazione è verificata nello strato di Binder e Base;
- ❖ Aumentando la percentuale di passante al setaccio 0.063 mm la resistenza a trazione indiretta aumenta. Questa situazione si verifica per lo strato di Base;
- ❖ Infine, la resistenza a trazione indiretta diminuisce al cresce del rapporto B/P0.063. Questa situazione si verifica per il Binder e Base.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- https://amslaurea.unibo.it/1746/1/Rosa_Lucia_Tesi.pdf [1]
- http://tesi.cab.unipd.it/47742/1/Tesi_Casarin_Melissa.pdf [2]
- Dispense del corso di Costruzione di Strade 2017/2018 - prof. Ing. Maurizio Bocci, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile Architettura, Università Politecnica delle Marche [3]
- http://tesi.cab.unipd.it/35413/1/TesiLT_MatteoConvertino0304.pdf [4]
- Felice A. Santagata - "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol. 1 e vol. 2 [5]
- Santella F., "Tutti i vantaggi del tiepido", Materiali, Le strade, n. 11, 2007. [6]
- Loprencipe G., DragoD., Quaderno AIPCR "Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali" per il XXV Convegno Nazionale Stradale -Comitato Tecnico C 4.3 "Pavimentazioni stradali", Napoli 4-7 Ottobre 2006. [7]
- <https://www.matest.com/it/asfalto/contenuto-legante-estrazione-bitume/> [8]
- http://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/4804_1.pdf [9]
- file:///C:/Users/lugli/AppData/Local/Temp/Le_pavimentazioni_stradali.pdf [10]

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il relatore di questa tesi, il professor. Maurizio Bocci per la sua disponibilità e le conoscenze trasmesse durante tutto il percorso di stesura dell'elaborato.

Vorrei anche ringraziare il professor. Edoardo Bocci e Carlo Carpani per i loro preziosi consigli che mi hanno permesso di concludere la presente tesi.

Inoltre i miei più sentiti ringraziamenti vanno ai miei genitori e mio fratello. Grazie per avermi trasmesso la passione per lo studio e per avermi aiutato a raggiungere questo traguardo.

Ringrazio la mia ragazza per la vicinanza negli anni di Università che più di tutti è stata capace di capirmi e di sostenermi nei momenti difficili.

Una dedica speciale ai miei amici, che ogni giorno hanno condiviso con me gioie, sacrifici e successi.