



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

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

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Vuoti residui nei grumi di conglomerato bituminoso di recupero

Residual voids in reclaimed asphalt pavement

Relatore:
Prof. Ing. **Maurizio Bocci**

Tesi di laurea di:
Emanuele Lalla

Correlatore:
Ing. **Emiliano Prospero**

SOMMARIO

Introduzione.....	3
Miscele a freddo.....	4
1.1 Riciclaggio a freddo nelle pavimentazioni stradali	4
1.2 Le miscele a freddo	6
1.3 I materiali	8
1.3.1 <i>Aggregati</i>	8
1.3.2 <i>Leganti</i>	10
1.4 Caratteristiche volumetriche delle miscele.....	15
Materiali e procedure.....	18
2.1 Caratterizzazione fisica	18
2.1.1 <i>“Black curve” e “White curve”</i>	18
2.2 Caratterizzazione volumetrica delle miscele.....	21
2.2.1 <i>Procedura adottata</i>	21
2.2.2 <i>Determinazione masse volumiche e vuoti residui</i>	23
Programma sperimentale	26
3.1 Inquadramento del progetto.....	26
3.2 Obiettivo.....	27
3.3 Programma sperimentale.....	27
Risultati della sperimentazione.....	28
4.1 Analisi granulometrica pre-estrazione di bitume	29
4.2 Analisi granulometrica post-estrazione di bitume.....	41
4.3 Masse volumiche pre e post estrazione	53
4.4 Percentuale di bitume e vuoti residui	56
4.4 Riepilogo delle caratteristiche delle miscele	58
Conclusioni.....	62
Bibliografia	63

Introduzione

Il tema del riciclaggio delle pavimentazioni stradali ha assunto negli ultimi anni crescente importanza. Con esso si indica il processo di recupero e riutilizzo delle pavimentazioni arrivate a fine vita utile, allo scopo di produrre nuovo conglomerato bituminoso. I vantaggi che ne conseguono sono sia di ordine ambientale che economico: l'impiego di materiale di recupero delle vecchie pavimentazioni, chiamato fresato, permette di evitare di estrarre nuovi aggregati dalle cave e di smaltire, ricollocandoli, i vecchi. Ulteriori vantaggi derivano dall'utilizzo della tecnica di riciclo a freddo, con ritorno in termini di impatto ambientale e di comfort dei lavoratori. Questa tesi rivolge la sua attenzione ai vuoti intergranulari nei grumi del fresato, in particolare a quella percentuale non saturabile dall'acqua, cioè quei vuoti non raggiungibili dall'emulsione bituminosa impiegata nella tecnica a freddo. A tale scopo è necessario indagare la composizione della miscela sia per quanto concerne l'assortimento granulometrico che la quantità di legante. In questo programma sperimentale sono state selezionate sei differenti miscele di fresato delle quali sono stati indagati i vuoti pre e post estrazione di legante bituminoso impiegando procedure standardizzate.

La presente tesi consta di quattro parti principali oltre l'introduzione:

1. Miscele a freddo: vengono riportate alcune informazioni sul riciclaggio a freddo e come esso impatti sulle caratteristiche principali delle pavimentazioni in cui viene impiegato
2. Materiali utilizzati e procedure: sono presentati i materiali impiegati nella sperimentazione, i metodi di prova utilizzati e le miscele investigate;
3. Programma sperimentale: sono trattati nel dettaglio gli obiettivi della sperimentazione;
4. Risultati della sperimentazione: vengono riportati i risultati delle prove eseguite e delle procedure utilizzate;
5. Conclusioni.

Capitolo 1

Miscele a freddo

1.1 Riciclaggio a freddo nelle pavimentazioni stradali

Gli strati della pavimentazione stradale possono essere realizzati utilizzando diverse tipologie di materiali, la più diffusa per le pavimentazioni di tipo flessibile è il conglomerato bituminoso. Il conglomerato bituminoso è costituito essenzialmente da aggregati aventi opportune caratteristiche in termini di aderenza e di rigidità, e dal bitume che, fungendo da legante, conferisce alla miscela un comportamento uniforme ed omogeneo.

In merito, un tema molto attuale è quello dell'utilizzo di miscele riciclate, aventi come componente principale il conglomerato bituminoso di recupero RA (*Reclaimed Asphalt*). È il cosiddetto "fresato", ossia quel materiale recuperato tramite appunto fresatura o scarificazione a blocchi degli strati delle pavimentazioni stradali ammalorate. Il fresato proviene solitamente dagli strati di base, binder e usura ed il suo impiego comporta numerosi vantaggi sia economici che ambientali, come:

- riduzione dell'impiego di materie prime vergini;
- riduzione delle problematiche e dei costi legati allo smaltimento del materiale (infatti in discarica verrebbe trattato come rifiuto speciale);

Nel caso del riciclaggio a freddo, che prevede che la miscelazione e la compattazione siano eseguite a temperatura ambiente, si hanno ulteriori vantaggi, quali:

- riduzione dei costi di trasporto in caso di riciclaggio a freddo in sito;
- riduzione dell'impatto ambientale, in quanto non si emanano in atmosfera i fumi derivanti dal riscaldamento del materiale;
- riduzione dei costi per riscaldare il materiale;
- possibilità di lavorare a temperature inferiori e a migliori condizioni per i lavoratori.

Le tecniche di riciclaggio sono classificate in base alla temperatura, distinguendo il riciclaggio a caldo ed il riciclaggio a freddo, ed in base al luogo di confezionamento che può in situ o in impianto.

Il fresato viene ottenuto tramite una macchina chiamata fresatrice (Figura 1.1.1) che permette di

ottenere opportuni valori delle quote e delle pendenze trasversali della pavimentazione sottostante agli strati rimossi.

La fresatrice frantuma i grani di dimensioni maggiori in relazione alla natura degli aggregati, ma la granulometria del fresato è diversa da quella del conglomerato bituminoso di recupero perché le particelle di materiale più fine sono inglobate nel bitume formando dei grumi.

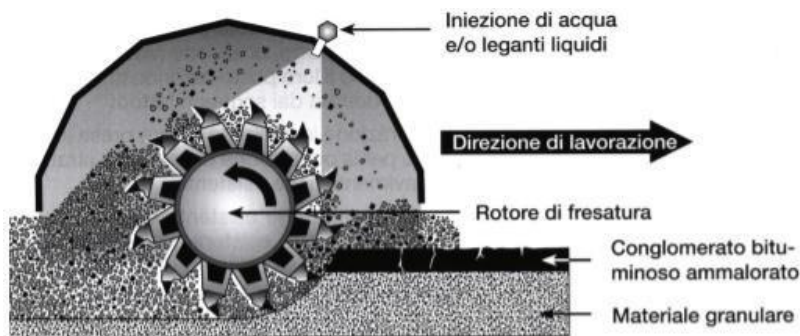


Figura 1.1.1.1 Operazione di fresatura della pavimentazione

Soffermandoci sul riciclaggio a freddo del conglomerato bituminoso, oggetto di questa tesi di laurea, il fresato può essere reimpiegato utilizzando gli aggregati nelle loro condizioni di umidità in sito, con percentuali di reimpiego, molto più alte rispetto alla tecnica a caldo, che possono raggiungere anche il 100% (contro il 10-40% della tecnica a caldo).

La tecnica di riciclaggio a freddo in situ si può effettuare impiegando i “treni a unità singola” o i “treni a unità multipla”, i quali consentono di fresare la pavimentazione ammalorata, miscelare contestualmente il materiale di recupero con acqua e legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato), quindi stendere il conglomerato bituminoso con la vibrofinitrice e con i rulli gommati per far fuoriuscire l’acqua in eccesso. Il materiale derivante dalla fresatura, per gravità finisce nel miscelatore dove vengono aggiunti, tramite degli iniettori, acqua, bitume e eventuali additivi. Il quantitativo d’acqua che viene aggiunto è tale da consentire una adeguata miscelazione e compattazione. I materiali necessari all’eventuale ottimizzazione e correzione della granulometria (aggregati di primo impiego) e altre aggiunte (come il cemento) vengono distribuite sulla pavimentazione preesistente (Figura 1.1.1.2).



Figura 1.1.1.2 Stesa di aggregati di aggiunta

Gli impianti per il riciclaggio a freddo possono essere fissi o mobili, continui o discontinui in base alle modalità di dosaggio degli aggregati. Le miscele riciclate in impianto offrono vantaggi circa l'ottimizzazione della miscela in quanto vengono eseguiti controlli sul dosaggio di fresato e dei leganti da aggiungere alla miscela in base alle caratteristiche desiderate.

Negli impianti di tipo continuo gli aggregati vengono portati tramite un nastro trasportatore ai successivi impianti di miscelazione, mentre negli impianti discontinui gli aggregati vengono prima dosati. Una volta mescolati, agli aggregati si aggiunge il cemento, l'acqua e il legante bituminoso. Una volta terminata la miscelazione, il materiale viene stoccato o portato in cantiere con i mezzi di trasporto. Il riciclaggio in sito è comunque da preferire ove possibile, dato che il trasporto in impianto andrebbe a ridurre parzialmente i vantaggi offerti dal riuso del RA, di contro può risultare più difficile controllare i dosaggi di aggregati e leganti

Comunque sia, dati i numerosi vantaggi che offre il riciclaggio a freddo, negli ultimi anni è aumentato il ricorso a questa tecnica per il risanamento delle pavimentazioni stradali.

1.2 Le miscele a freddo

Le miscele riciclate a freddo sono ottenute a partire da:

- Conglomerato bituminoso di recupero (RA), impiegabile in quantità fino al 100%;
- Eventuali aggregati vergini di aggiunta per correggere la curva granulometrica;
- Legante bituminoso, come emulsione bituminosa o bitume schiumato, in quantità che variano dal 3% al 6%;
- Cemento, che funge da legante idraulico;

- Acqua, aggiunta eventualmente per garantire maggior lavorabilità alla miscela in fase di stesa e compattazione.

Nelle miscele a freddo la componente liquida è molto importante perché oltre a migliorare la lavorabilità della miscela stessa, funge da lubrificante durante la fase di compattazione sostituendo il calore. Ciononostante l'acqua non deve essere in eccesso altrimenti impedirebbe ai granuli di incasellarsi (bisogna considerare che in presenza di emulsione bituminosa c'è già molta acqua disponibile, a cui, nel caso delle miscele a freddo, si somma l'umidità del materiale impastato a freddo). Se l'acqua dovesse risultare in eccesso la corretta pratica dovrebbe essere quella di aspettare che il materiale in sito si asciughi.

Le miscele a freddo sono classificate in base alla percentuale di cemento e di bitume. Il bitume conferisce alla miscela duttilità e flessibilità per ridurre le fessure da fatica, mentre il cemento conferisce la rigidità per contrastare le deformazioni permanenti. Il dosaggio ottimale di cemento e bitume dipende dalla funzione che dovrà svolgere un determinato strato della pavimentazione. Aumentando il dosaggio del bitume nella miscela si ottiene una maggiore resistenza a fatica, e uno strato con queste caratteristiche può fungere da base; se si aumenta il dosaggio di cemento, invece, si ha una maggior rigidità per cui si può adottare questa miscela per lo strato di fondazione.

Secondo la classificazione della *Asphalt Academy* si distinguono cinque gruppi di miscela variando il contenuto di bitume e di cemento (Figura 1.2.:

- PCC (*Portland Cement Concrete*), l'unico agente legante è il cemento presente in quantità maggiore del 6% (questo genere di materiale presenta un comportamento fragile);
- CTM (*Cement Treated Materials*), presenta un contenuto di cemento tra il 2% e il 6%, e quantità nulla di bitume;
- BSM (*Bitumen Stabilized Materials*), presentano una quantità di cemento fino all' 1% (utilizzato come riempitivo) e bitume residuo fino al 3%;
- CBTM (*Cement-Bitumen Treated Materials*), presenta un contenuto di cemento e bitume compresa tra 1% e 3%;
- CMA (*Cold Mix Asphalt*), presentano una quantità di cemento fino al 2% e contenuta percentuale di bitume, tra 3% e 6%.

Variando la granulometria degli aggregati e la quantità di bitume si ottengono miscele con caratteristiche diverse e, in base alla percentuale dei vuoti vengono denominate chiuse, semichiuse, semiaperte, o aperte.

Il conglomerato bituminoso viene impiegato per strato di base, strato di collegamento e manto d'usura; in generale minore è la percentuale dei vuoti nella miscela e migliori sono le caratteristiche di resistenza meccanica, per cui il manto d'usura è caratterizzato da una miscela

chiusa a differenza degli strati sottostanti che sono caratterizzati da miscele semiaperte o aperte. Un'eccezione è rappresentata dai tappeti di usura di tipo drenante in cui al contrario si richiede un elevato tenore di vuoti per consentire un rapido deflusso dell'acqua, limitando così fenomeni pericolosi quali aquaplaning e spray. Questa caratteristica implica però una minore durabilità della pavimentazione.

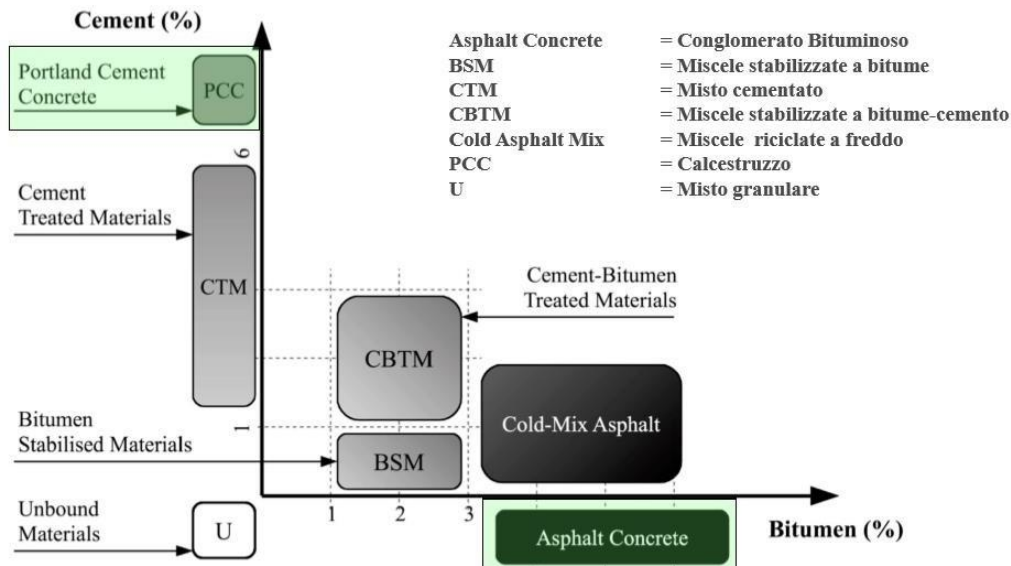


Figura 1.1.2.1 Classificazione delle miscele secondo Asphalt Academy

1.3 I materiali

Di seguito sono analizzati i vari materiali che si utilizzano nella produzione di miscele riciclate a freddo.

1.3.1 Aggregati

La norma UNI-EN 13043 definisce aggregato il materiale granulare utilizzato nelle costruzioni e lo suddivide in: naturali, artificiali e riciclati. L'aggregato naturale deriva da rocce sciolte o da frantumazione di rocce compatte ed è stato soggetto solo alla lavorazione meccanica; l'aggregato artificiale invece è stato sottoposto a un processo industriale che implica una modificazione termica o di altro genere: esempi sono loppe d'altoforno, ceneri volanti o polistirolo; l'aggregato riciclato deriva dalla lavorazione di materiale inorganico, precedentemente utilizzato nell'edilizia da costruzione o derivante da

demolizione/scomposizione di pavimentazioni esistenti.

La conformità degli aggregati in termini di proprietà geometriche, fisiche e chimiche, è garantita dalla marcatura CE.

La designazione dell'aggregato viene espletata tramite analisi granulometrica e definita in base alle sue dimensioni rispetto al setaccio di misura inferiore (d) e superiore (D), espressa come d/D.

La normativa europea suddivide l'aggregato in:

- Grosso, con $D \geq 4$ mm e $d \geq 2$ mm;
- Fine, con $D \leq 4$ mm e $d = 0$ mm;
- In frazione unica, Grosso e Fine miscelati scartando la frazione troppo grossa;
- Filler, materiale passante al setaccio 0,063 mm che viene aggiunto alla miscela per conferire determinate proprietà.

Il fresato che viene utilizzato nei processi di riciclaggio a freddo deve essere campionato e sottoposto all'analisi granulometrica per ottenerne la curva granulometrica. La curva ottenuta deve rientrare nei fusi granulometrici prescritti dai capitolati, altrimenti deve essere corretta tramite aggregati di primo impiego (Figura 1.1.3.1).

I conglomerati bituminosi, ad eccezione dei tappeti drenanti, sono chiusi, data la necessità di alte prestazioni meccaniche e durabilità. È comunque necessario mantenere un certo tenore di vuoti

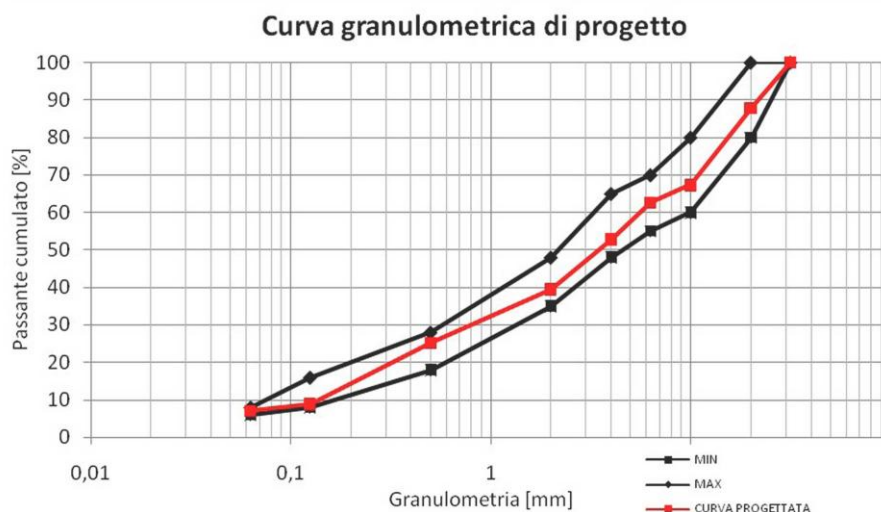


Figura 1.1.3.1 esempio di fuso granulometrico e curva di progetto

per evitare trasudamenti e permettere al bitume di rivestire uniformemente i granuli. Di norma viene utilizzata come riferimento la curva di Fuller - Thompson che garantisce il massimo addensamento e quindi il valore minimo dei vuoti nella miscela:

$$P = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

Dove:

P = passante cumulativo al setaccio di dimensione d, espresso in percentuale
d = apertura del setaccio considerato in millimetri

D = dimensione massima dell'aggregato, in millimetri

n = solitamente 0.5 (0.45 nel metodo "Superpave", con addensamento ancora maggiore)

A volte nella miscela viene aggiunto anche il filler che ha lo scopo di favorire la dispersione del bitume all'interno di essa. Quando si utilizza bitume schiumato, la quantità e la qualità di filler è fondamentale perché insieme al bitume, formano un mastice che conferisce funzione legante con gli aggregati più grossi. Nel caso in cui si utilizzi l'emulsione bituminosa, la quantità di filler è meno importante perché il bitume ricopre già da sé una parte degli aggregati più grossi, e in questo caso ha lo scopo di correggere la curva granulometrica, qualora la frazione fine sia insufficiente. Dalla quantità di filler dipende anche la velocità di rottura dell'emulsione.

1.3.2 Leganti

I leganti utilizzati nelle miscele a freddo sono bituminosi, generalmente emulsione bituminosa e bitume schiumato e di tipo idraulico, come il cemento.

Emulsione bituminosa

Il bitume è un materiale organico con potere legante e impermeabilizzante. È termo-dipendente, in particolare termoplastico, ossia ha bisogno di essere riscaldato attorno ai 150°C-180°C per essere impastato e lavorato; una volta raffreddato diventa rigido con conseguente miglioramento delle sue proprietà meccaniche, diventando in grado di sopportare i carichi di traffico. Per rendere lavorabile il bitume e abbattere la sua viscosità possono essere utilizzati altri metodi oltre all'uso di energia termica:

- Miscelazione con solventi di petrolio;
- Produzione di bitume schiumato;
- Emulsione in acqua per ottenere emulsione bituminosa.

Le specifiche tecniche dei bitumi per uso stradale sono contenute nella norma UNI-EN 12591. L'emulsione bituminosa è una delle tecniche che possono essere utilizzate per ridurre la viscosità del bitume in modo da poterlo utilizzare con gli aggregati a temperatura ambiente, riducendo la fase di riscaldamento e traendo vantaggi economici, ambientali ed energetici. L'emulsione bituminosa è composta da una fase disperdente costituita dall'acqua e una fase dispersa che è il bitume. Possono essere aggiunti degli agenti emulsionanti. Le emulsioni vengono classificate in base alla percentuale di bitume residuo sul volume totale, al grado di acidità, alla velocità di rottura o in base alla capacità di impastare leganti idraulici: in ambito stradale, l'emulsione ha un contenuto di bitume generalmente pari al 60% mentre il restante 40% è costituito da acqua. Attualmente nel mercato sono disponibili emulsioni con bitume residuo di 50%, 55%, 60%, 65% e 69%.

Può essere impiegata tramite spruzzatura o impasto: nel primo caso si possono realizzare mani d'attacco, trattamenti superficiali o trattamenti di depolverizzazione; nel secondo micro tappeti a freddo, strati di base a freddo e strati di fondazione stabilizzati.

Tra le proprietà intrinseche dell'emulsione bituminosa si ricordano:

- La viscosità, che dipende dalla concentrazione del bitume disperso, dal greggio di origine e dall'emulsionante utilizzato;
- La stabilità allo stoccaggio, che impedisce la separazione dell'emulsione nei suoi elementi costituenti.
- La velocità di rottura, cioè il tempo necessario alla separazione del bitume dall'acqua.

Man mano che il bitume si separa dall'acqua aumenta la viscosità mentre si riduce la lavorabilità. Questo fenomeno è chiamato "rottura dell'emulsione bituminosa" e dipende dalla dimensione degli aggregati: ad aggregati più piccoli corrisponde una superficie specifica maggiore e quindi rottura più veloce; parallelamente umidità maggiore rallenta il processo di separazione delle due frazioni.

Il processo di rottura dell'emulsione si sviluppa attraverso le seguenti fasi (Figura 1.1.3.2):

1. Decantazione e flocculazione: le goccioline di bitume si depositano e aggregano;
2. Coagulazione: fusione delle goccioline;
3. Presa: completa espulsione dell'acqua che defluisce.

In particolare la fase di presa si verifica quando il legante viene a contatto con l'aggregato. I vari coaguli di bitume iniziano a perdere l'acqua intrappolata al loro interno e aderiscono completamente all'aggregato. Man mano che l'acqua viene espulsa il colore diventa sempre più scuro, virando dal marrone al nero.

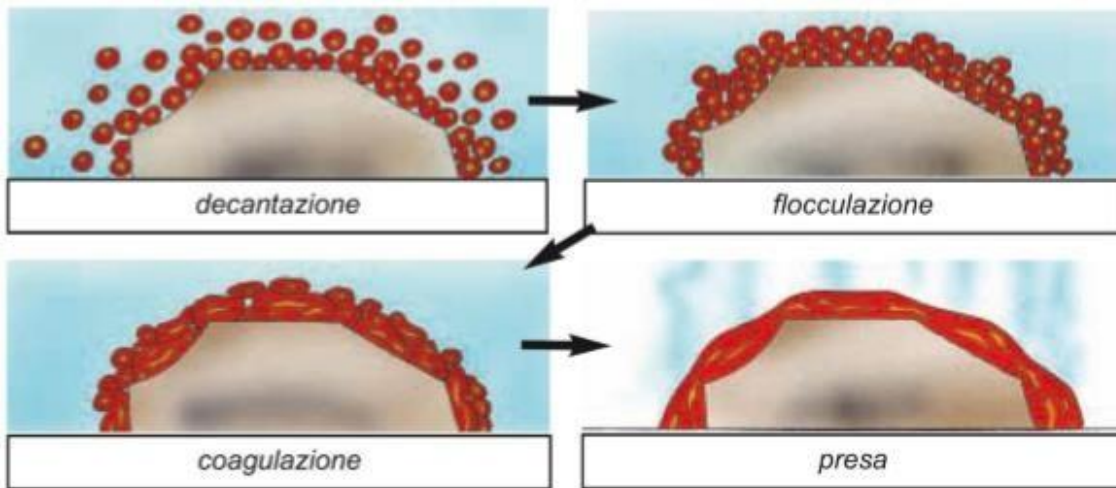


Figura 1.1.3.2 Processo di rottura e presa dell'emulsione bituminosa

La velocità di rottura dell'emulsione bituminosa dipende da altri fattori oltre a quelli già citati come la temperatura dell'emulsione stessa, la natura chimica degli inerti, la presenza di legante idraulico, la presenza di agenti contaminanti o polvere, le modalità di esecuzione del lavoro, ecc.

In relazione alla velocità di rottura le emulsioni bituminose sono classificate come:

- Rapide (R)
- Medie (M)
- Lente (L)
- Super rapide (RR)
- Sovra-stabilizzate (LL)

Per le miscele riciclate a freddo si utilizzano emulsioni di tipo LL così da evitare che la rottura possa avvenire durante la fase di miscelazione o la compattazione anche in presenza di cemento. Anche la carica superficiale influenza il rendimento dell'emulsione, difatti le emulsioni cationiche, seppure più difficili da produrre, sono largamente più affidabili di quelle anioniche. La carica dipende dall'impiego di agenti emulsionanti che inoltre agevolano la dispersione del bitume. Il residuo bituminoso può essere tal quale o modificato: se la modifica si realizza per mezzo di bitume modificato si parla di emulsioni modificate monofase, se invece l'agente modificante è aggiunto sotto forma di goccioline disperse (solitamente lattice di gomma) l'emulsione è modificata bifase.

Bitume schiumato

Il bitume schiumato è uno stato fisico del bitume caratterizzato da bassa viscosità. Il bitume viene riscaldato a oltre 160°C e ad esso è aggiunta acqua fredda (2-3% in massa) in un'apposita camera di miscelazione o espansione (Figura 1.1.3.3). Quando l'acqua viene a contatto con il bitume caldo, si riscalda fino a 100°C trasformandosi in vapore. Così facendo si creano bollicine di vapore che mescolandosi al bitume provocano espansione volumetrica di quest'ultimo. Le bollicine sono ricoperte da un film di bitume che conferisce al legante una consistenzaschiumosa, con aumento di volume, rispetto allo stato fluido, di circa 15-20 volte, in funzione della percentuale di acqua e di bitume utilizzato. In queste condizioni il bitume è molto più lavorabile e particolarmente adatto ad essere impastato con aggregati freddi e umidi.

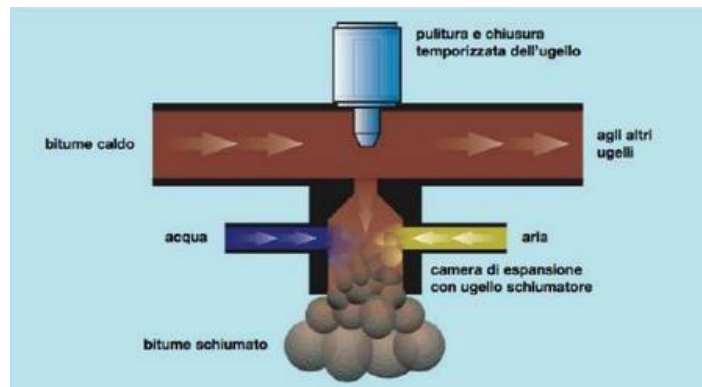


Figura 1.1.3.3 Produzione del bitume schiumato

Aumentando la percentuale di acqua aumenta la dimensione delle bolle ma si riduce lo spessore della pellicola di bitume, provocando minore stabilità della schiuma e conseguente diminuzione del tempo in cui la schiuma è espansa. Infatti lo stato schiumoso del bitume è solo temporaneo e si identifica attraverso due parametri:

- Il rapporto di espansione (ER_m): è il rapporto tra il massimo volume raggiunto dallo stato schiumoso e il volume;
- Il tempo di semi-trasformazione ($\tau_{1/2}$): è il tempo che intercorre tra l'istante in cui il bitume schiumato occupa un volume V e quello in cui occupa un volume pari alla metà $V/2$.

Come già detto il rapporto di espansione e il tempo di semi-trasformazione sono funzione del quantitativo d'acqua e del tempo ma anche della viscosità del bitume: più bassa risulta essere la

viscosità e maggiori saranno i due parametri caratterizzanti.

L'ottimizzazione del bitume schiumato si effettua valutando ER_m e $\tau_{1/2}$ a diverse percentuali d'acqua. Valori di riferimento tipici sono ER_m maggiore di 20 e $\tau_{1/2}$ maggiore di 25 secondi. La procedura si ripete con bitume a diverse temperature fino ad ottenere le condizioni ottimali per eseguire le operazioni, che possono avvenire tramite produzione e miscelazione contestuale in cantiere oppure con un impianto mobile (Figura 1.1.3.4).

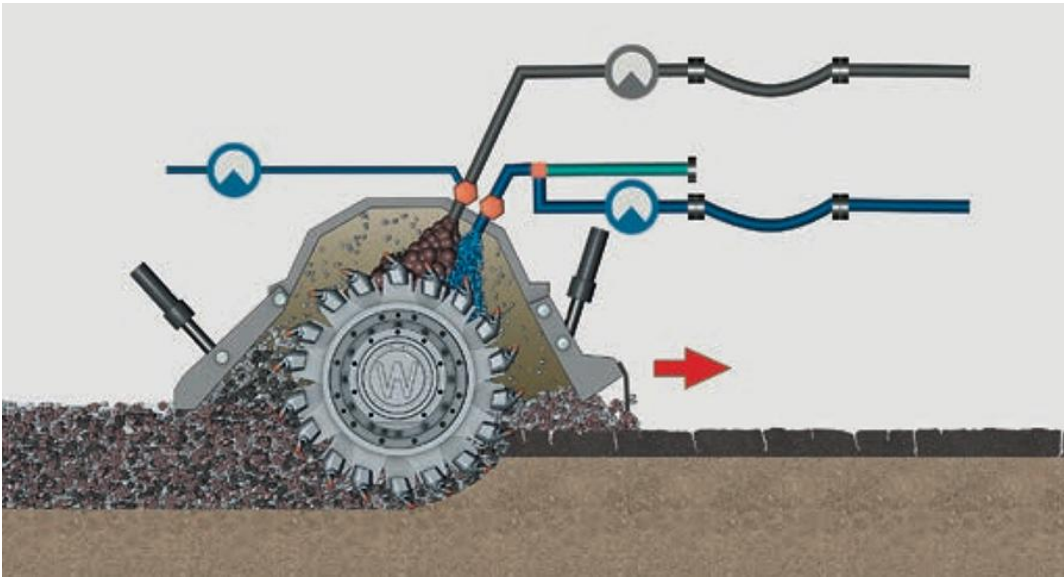


Figura 2.1.3.4 bitume schiumato miscelato in sito

Filler

Il filler svolge un ruolo fondamentale all'interno delle miscele per pavimentazioni stradali, in particolare favorisce la dispersione del bitume nella miscela stessa ed evita trasudamento aumentando la stabilità delle miscele ed evitando lo spogliamento degli inerti. Può essere sia di tipo naturale che di tipo artificiale/sintetico.

Cemento

Nella miscela il cemento è il legante idraulico. Esso è composto da polvere finissima in grado di creare legami e reagire con l'acqua secondo due fasi principali:

Presatura: perdita di lavorabilità dell'impasto. Dura qualche ora ed è un processo fisico.

Indurimento: aumento delle proprietà meccaniche apprezzabile dopo qualche giorno. Processo di tipo chimico

Principalmente è formato da clinker, che combinato con altri componenti, dà origine ai diversi

tipi di cemento. Il tipo di cemento più utilizzato è il Portland, cemento caratterizzato dalla presenza predominante di argilla e calcare, inserite in forno rotante fino a 1400-1450 °C. man mano che le materie si cuociono escono dal fondo del forno formando il clinker. Per essere trasformato in cemento il clinker deve essere macinato finemente fino ad ottenere polveri di diametro dell'ordine di qualche micrometro. Al clinker deve essere sempre aggiunto gesso al 5% che funge da regolatore di presa. I cementi sono classificati in base alla resistenza caratteristica a 28 giorni (32.5, 42.5 52.5 N/R a seconda che la presa sia Normale o Rapida) e a seconda della percentuale di clinker impiegato e delle aggiunte che lo sostituiscono in CEM I-II-III-IV-V. Alcuni materiali tipici utilizzati in luogo del clinker sono:

- Cenere volante, residuo delle centrali termiche a carbone, particelle sferiche con granulometrie simili al cemento;
- Fumi di silice, provenienti dalla produzione di silicio e di leghe ferro-silicio, avendo una granulometria molto bassa reagisce velocemente;
- Loppa d'altoforno, scoria delle acciaierie. Ha basse proprietà leganti ma può essere impiegato ad alte percentuali di sostituzione;
- Additivi.

1.4 Caratteristiche volumetriche delle miscele

Dalle caratteristiche volumetriche dipendono sensibilmente le prestazioni meccaniche e la durabilità della miscela stessa, sono quindi fondamentali per le miscele bituminose sia nella fase progettuale che nelle fasi di controllo della qualità. Utilizzando opportuni indici volumetrici è possibile valutare il grado di compattazione delle miscele.



Figura 1.1.4.1 Pressa giratoria con un provino

La compattazione può essere eseguita con la pressa a taglio giratoria che permette di identificare il numero di rotazioni (N_{design}) in grado di riprodurre l'addensamento ultimo in sito, tenendo conto della compattazione dei rulli e della post-compattazione causata dai carichi da traffico veicolare. Un volume unitario di miscela di riciclato a freddo può essere schematizzato come un sistema multifase formato da aria (vuoti), acqua, bitume, cemento e aggregati (Figura 1.1.4.1).

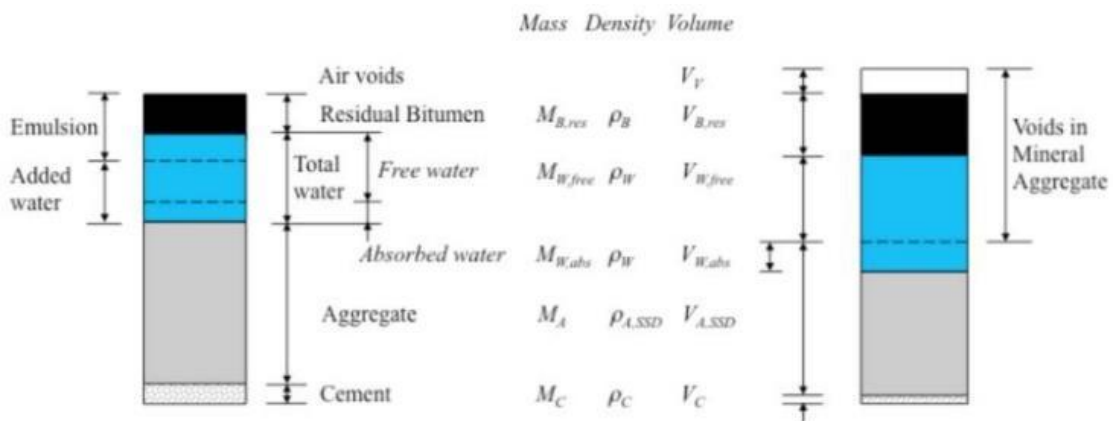


Figura 1.1.4.2 Composizione miscela di conglomerato riciclato

Il contenuto di acqua totale nella miscela (V_w) è dato dalla somma dell'acqua assorbita dagli aggregati ($V_{w,abs}$) e dall'acqua libera negli interstizi ($V_{w,free}$) che agevola il processo di compattazione, riducendo l'attrito interno tra le particelle solide. La quantità di acqua totale è data dalla somma dell'acqua proveniente dall'emulsione bituminosa e dell'acqua aggiunta in fase di miscelazione. I vuoti tra gli elementi solidi (V_A , *Voids in the Aggregate*) sono la percentuale cumulativa di volume occupato tra le particelle solide (aggregato e cemento), cioè riempiti da acqua, aria e bitume. Tale indice può essere utilizzato per valutare il grado di compenetrazione tra gli elementi costituenti lo scheletro solido e vengono definiti dalla relazione:

$$V_A = \frac{V_V + V_{b,res} + V_{w,free}}{V_{TOT}}$$

Dove:

V_V = volume dei vuoti d'aria;

$V_{b,res}$ = volume del bitume residuo;

$V_{w,free}$ = volume dell'acqua libera (non assorbita dagli aggregati); V_{TOT} = volume totale del composto.

L'indice dei vuoti in miscela (V_m , *Voids in mixture*) è definito come la percentuale di volume occupata dai vuoti d'aria e dall'acqua libera, che rappresentano i componenti non strutturali della miscela, e viene definito dalla relazione:

$$V_m = \frac{V_v + V_{w,free}}{V_{TOT}} \times 100$$

Un altro parametro importante per definire una miscela è l'indice dei vuoti saturati da liquido (VFL, *Voids Filled with Liquids*), che indica la percentuale di VA occupati da acqua e bitume, che si può calcolare nel seguente modo:

$$VFL = \frac{V_{b,res} + V_{w,free}}{V_v + V_{b,res} + V_{w,free}} \times 100$$

Questo parametro permette di valutare l'efficacia della compattazione della miscela: se VFL risulta minore del 100%, la miscela contiene ancora vuoti d'aria e quindi non è del tutto satura, mentre se VFL raggiunge (o supera) il 100%, la miscela è satura e l'acqua libera insieme alle particelle di bitume disperse in essa, viene espulsa dal provino. Un'eccessiva compattazione potrebbe causare perdite indesiderate di materiale e variazioni nella composizione della miscela. Come in tutti i materiali, la porosità influenza la resistenza meccanica, il modulo elastico, la permeabilità e la durabilità.

Mano a mano che il grado di idratazione aumenta, il materiale indurisce e fa presa, ma permangono delle porosità:

- Macropori (mm), cioè bolle d'aria intrappolate o prodotte da una scarsa compattazione, che si presentano più facilmente in superficie, lasciando quindi il materiale più aggredibile dagli agenti atmosferici.
- Nanopori, è una porosità intrinseca del materiale, non modificabile e talmente piccola che non causa problemi di prestazione e durabilità.
- Porosità capillare (0,1-1 mm), può essere facilmente modificata e viene determinata attraverso la formula di Powers come:

$$V_p = 100a/c - 36,15\alpha$$

α = rapporto cemento idratato/cemento totale

a=quantitativo d'acqua

c = quantitativo di cemento

Capitolo 2

Materiali e procedure

2.1 Caratterizzazione fisica

Nel corso di questa sperimentazione sono stati indagati i vuoti residui all'interno di sei diverse miscele di fresato, provenienti da siti e ditte differenti.

2.1.1 “Black curve” e “White curve”

Analisi granulometrica

Le miscele a freddo hanno come componente principale il conglomerato bituminoso di recupero, ossia il fresato. Le sei miscele di fresato sono state caratterizzate fisicamente tramite vagliatura meccanica, effettuata mediante l'impiego di setacci a dimensione decrescente, determinandone così la distribuzione granulometrica. In questo modo si ottiene la cosiddetta “*black curve*” corrispondente al materiale tal quale, cioè quella curva granulometrica riferita ad aggregati vergini e bitume che, solidali tra di loro, costituiscono gli elementi granulari della miscela. Precedentemente a ciò ogni miscela è stata sottoposta a lavaggio: con l'ausilio di un setaccio con apertura 0.063 mm tutta la parte “troppo fine” è stata eliminata (Figura 2.1.1.1). Così facendo si pulisce il materiale sia dal filler proprio dello strato di provenienza del fresato sia dalle eventuali impurità e particelle terrose che siano state grattate nelle fasi di rimozione e recupero, co. In accordo con la normativa UNI EN 933-1:2012 l'analisi granulometrica è stata eseguita tramite setacciatura per via secca. La procedura di prova prevede l'essiccazione della porzione da testare, selezionata previa quartatura, in forno a una temperatura di 110°C fino al raggiungimento della massa costante (in questo caso si è ritenuto conveniente mantenere la temperatura attorno ai 70°C, onde evitare lo scioglimento del bitume). Si registra quindi la massa M1 degli aggregati essiccati. Tale massa viene versata in una colonna di setacci scelti tra quelli proposti dalla normativa. Questi sono sovrapposti dall'alto verso il basso, dal setaccio a maglia più grande a quella più piccola, con il fondello come ultimo



Figura 2.1.1.1 lavaggio del fresato



Figura 2.1.2.2 Colonna di setacci montata su vibrovaglio

contenitore e il coperchio come primo elemento della colonna. La colonna viene agitata manualmente per alcuni secondi e quindi meccanicamente per 10 minuti utilizzando un vibrovaglio. Si determina quindi la massa del trattenuto ad ogni singolo setaccio e la si registra con R_i ($i = 1,2,3,\dots, n = \text{numero di setacci}$); si registra il materiale nel fondello con P . Da qui si possono avere informazioni circa i trattenuti come percentuale di M_1 e la percentuale cumulativa rispetto alla massa essiccata d'origine del passante attraverso ogni staccio. In accordo con le equazioni seguenti si trovano:

-La percentuale del trattenuto al setaccio i -esimo e cumulativa al setaccio i -esimo:

$$t_i = \left(\frac{R_i}{M_1} \right) \cdot 100 \quad T_i = \sum_{j=1}^i t_j$$

-La percentuale cumulativa del passante al setaccio i -esimo:

$$P_i = 100 - \sum_{j=1}^i t_j = 100 - T_i$$

Nel corso di questa sperimentazione è stata utilizzata la seguente serie di setacci: 20, 16, 12.5, 8, 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 dove ogni numero indica l'apertura in mm delle maglie nel setaccio.

Eseguita l'analisi granulometrica tutte le miscele sono state spezzate in due curve granulometriche, 0-5 e 5-20, al fine di distinguere il diverso tenore di vuoti per una frazione più fina e una più grossa dello stesso fresato. Bisogna intendere quindi che ogni operazione e ogni procedura descritta da questo momento in poi sia stata effettuata distintamente per le due classi di ogni miscela.

Estrazione di bitume

La fase successiva consta, in accordo con la norma UNI EN 12697-1, dell'indagine su quello che è il contenuto di bitume di ogni miscela. Questo passaggio si realizza tramite estrazione di bitume per mezzo appunto di un estrattore dell' Infratest (Figura 2.1.2.1) . Questo macchinario si serve di un solvente – il tetracloroetilene – che combinando la sua azione con quella di temperatura ed ultrasuoni restituisce gli aggregati “bianchi”, spogliati del bitume. In dettaglio si pesa circa un kg di fresato (preventivamente asciugato in forno) e si pone all'interno di un apposito cestello forato da inserire direttamente nella centrifuga del macchinario. Nella camera di lavaggio solvente, ultrasuoni e temperatura, uniti all'azione centrifuga del cestello che gira ad alta velocità, sciolgono il bitume, lavando gli aggregati. Vengono eseguiti più cicli di lavaggio per una durata complessiva dell'intero processo di circa 45 minuti/1 ora. Una volta terminato l'iter il macchinario permette di recuperare il cestello, all'interno del quale a questo punto sono rimasti solamente gli inerti. Difatti il bitume, il solvente ed il filler presente nei grumi di fresato sono usciti dai fori nella parete del cestello. In particolare quest'ultimo è convogliato dal macchinario fuori dalla camera di lavaggio e raccolto per gravità in una capsula mentre il bitume e il solvente confluiscono in un vano apposito dove si separano successivamente per decantazione.



Figura 2.1.2.1 Macchinario per estrazione di bitume

A questo punto è possibile conoscere la percentuale di bitume che era presente nella miscela di fresato tramite la seguente formula:

$$B(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{M_{agg} + M_{fil}}{M_{TOT}} \right)$$

Dove:

M_{agg} è la massa dell'aggregato rimasto nel cestello

M_{fil} è la massa del filler raccolto nella capsula

M_{TOT} è la massa totale del fresato inserito nel cestello e pesato inizialmente

Analisi granulometrica post-estrazione

Sugli inerti puliti (post estrazione) è possibile effettuare la setacciatura meccanica e ottenere conseguentemente una nuova curva. La cosiddetta “*white curve*” ottenuta sarà ovviamente molto diversa dalla curva individuata precedentemente all'estrazione di bitume, in particolare risulterà più spostata verso le frazioni più fini, dato che il bitume, oltre a costituire direttamente un ispessimento dei granuli in virtù del suo volume, teneva insieme più aggregati e particelle fini e imprigionava bollicine d'aria (vuoti residui). Inoltre la granulometria ultima non sarà nemmeno corrispondente a quella che si aveva in sito precedentemente alla rimozione dello strato ammalorato, questo perché il passaggio del pulvimixer frantuma non solo il legante bensì anche molti aggregati: ne consegue anche in questo caso una curva con maggiore percentuale di materiale fine.

2.2 Caratterizzazione volumetrica delle miscele

2.2.1 Procedura adottata

Fondamentale per lo scopo di questa tesi è l'indagine delle masse volumiche degli aggregati. Una massa volumica è definita come rapporto tra la massa e il volume dei granuli degli aggregati. Per determinarla ci si riferisce alla normativa UNI EN 1097-6 che individua nel picnometro la strumentazione da adottare. Grazie ad esso si può inoltre conoscere il contenuto d'acqua d'assorbimento nei grani, utile a ricavare il valore dell'acqua libera necessaria per garantire un'idonea lavorabilità in fase di miscelazione, aspetto però non approfondito in questa sperimentazione.

Il picnometro è un flacone di vetro dotato di imbuto. La massa volumica degli aggregati è ottenuta per mezzo di più pesate con il picnometro. A seguito dell'analisi granulometrica sono stati preparati due picnometri, uno per l'aggregato grosso (5-20) e l'altro per l'aggregato fine (0-5), come stabilito dalla normativa stessa, e si prosegue con le seguenti fasi applicando il “Metodo picnometrico per aggregati con granuli compresi tra 4 mm e 31,5 mm” (non dovendo effettuare un'indagine SSA del tutto analoga a “Metodo picnometrico per aggregati con granuli compresi tra 0,063 mm e 4 mm”):

1. Aggiungere l'acqua a temperatura di prova (22 ± 3) °C;
2. Rimuovere le bolle d'aria create scuotendo e agitando delicatamente il picnometro tenuto nella posizione inclinata;
3. Condizionare il picnometro per ($24\pm 0,5$) h nella cella climatica alla temperatura di prova;
4. Rimuovere eventuali bolle d'aria rimaste intrappolate con leggere rotazioni e scuotimenti oppure utilizzare la pompa a vuoto (risultando più efficace, nel corso di questa sperimentazione è stata utilizzata una pompa per il vuoto, al fine di ottenere calcoli più accurati possibili. L'aria estratta del picnometro è fatta passare in una seconda ampolla in cui sono presenti dei cristalli per assorbirne l'umidità);
5. Riempire il picnometro con acqua fino alla tacca di riferimento posta nel collo dell'imbuto, quindi pesare e determinare M2. In questa fase deve essere registrata anche la temperatura di prova perché da essa si risale alla massa (valore tabellato) corrispondente al peso del picnometro + imbuto (Figura 2.1.2.1);
6. Essiccare l'aggregato in stufa a 40°C fino al raggiungimento della massa costante M4.



Figura 2.1.2.1 fase di estrazione dell'aria dal picnometro

Le stessa operazione viene ripetuta sull'aggregato bianco, successivamente all'estrazione del bitume: pulito dal filler (passante a, setaccio 0,063 mm), che post analisi granulometrica viene scartato, si ripetono le operazioni in ordine dal punto 1 al punto 6.

2.2.2 Determinazione masse volumiche e vuoti residui

Massa volumica apparente

Per il calcolo delle masse volumiche apparenti dei granuli viene impiegata le seguente formula:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_3 - M_2)}$$

nella quale:

- ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova;
- M_2 è la massa del picnometro + aggregato + acqua fino al menisco;
- M_3 è la massa del picnometro pieno d'acqua (tabellata);
- M_4 è la massa netta dell'aggregato post essiccazione in forno.

Con la stessa formula si ricava la massa volumica apparente sia sui granuli di fresato $\rho_{a_{pre}}$ sia sugli aggregati post estrazione $\rho_{a_{post}}$.

Determinazione della massa volumica massima

La massa volumica massima rappresenta la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela di conglomerato bituminoso, alla corrispondente temperatura di prova. Il procedimento con cui viene determinata è descritto nella norma UNI EN 12697-5 che propone tre metodi: volumetrico, idrostatico e matematico. In questa sede è stato considerato solo il metodo matematico, in cui la massa volumica massima è stata determinata per le miscele allo stato fresco a partire dalla composizione della miscela e dalle masse volumiche dei materiali di cui è composta, secondo la seguente espressione:

$$\rho_{max} = \frac{100}{\frac{100 - p_b}{\rho_a} - \frac{p_b}{\rho_b}}$$

In cui:

$p_a = 100 - p_b$ percentuale dell'aggregato rispetto alla miscela (aggregato + bitume);

p_b = percentuale di bitume rispetto alla miscela (aggregato + bitume);

ρ_a = densità dell'aggregato.

ρ_b = densità del bitume.

Percentuale di vuoti residui

L'ultima operazione è quella di identificare i vuoti residui nei grumi del conglomerato bituminoso di recupero. A tal proposito si utilizza la formula seguente:

$$\% \text{ vuoti} = \frac{\rho_{max} - \rho_{a_{pre}}}{\rho_{max}}$$

con ρ_{max} e $\rho_{a_{pre}}$ definiti precedentemente.

2.3 Miscele studiate

Di seguito sono presentati le sei miscele di fresato sperimentate.



Fresato A



Fresato B



Fresato C



Fresato D



Fresato E



Fresato F

Il fresato A proviene dalla rimozione di un tratto di SS 76 della Val d'Esino nei pressi di Fabriano.

I fresati B, D, E, sono stati prelevati presso siti di stoccaggio.

Il fresato C è stato fornito dalla “Cooperativa Braccianti Riminese”.

Anche il fresato F proviene dalla SS 76 ed è stato prelevato nei pressi di Perugia.

Capitolo 3

Programma sperimentale

3.1 Inquadramento del progetto

Questa tesi sperimentale si propone come obiettivo quello di indagare il regime dei vuoti all'interno di miscele riciclate a freddo. Come già detto i vuoti all'interno delle miscele bituminose per pavimentazioni stradali esercitano una grande influenza sulle caratteristiche meccaniche della pavimentazione stessa, inoltre anche la durabilità della pavimentazione, soggetta carichi di traffico e agenti meteorici, è funzione della percentuale di vuoti presente nella miscela. In particolare l'aumentare del volume dei vuoti condiziona negativamente sia le prestazioni meccaniche sia longevità della pavimentazione. A questo punto risulta evidente che, e nel corso della progettazione, e nella realizzazione e messa in opera di una pavimentazione, la percentuale dei vuoti residui vada ridotta quanto più possibile per ottenere miscele chiuse (fanno eccezione i tappeti d'usura drenanti). Fondamentale a questo scopo risulta essere la fase di compattazione che segue in ogni caso la fase di miscelazione e stesa.

Nel caso particolare del riciclaggio a freddo, a prescindere che si realizzi la tecnica in sito o in impianto, risulta molto efficace eseguire la compattazione tramite rullo gommato, in modo da espellere l'acqua interstiziale. Anche eseguendo la compattazione correttamente non si riesce ad agire su una percentuale di vuoti, chiamati appunto residui, che sono intrappolati all'interno dei grumi del fresato. Difatti al passaggio del pulvimixer alcuni inerti rivestiti di bitume rimangono solidali con altri, con conseguente formazione di interstizi non accessibili dai leganti impiegati nella pavimentazione riciclata.

3.2 Obiettivo

Ciò premesso si capisce perché questa tesi nasca con lo scopo di indagare proprio il volume dei vuoti residui nei fresati. L'interesse è posto sul tenore di vuoti in diverse miscele di fresato per poterne eventualmente studiare correlazioni con altre grandezze.

3.3 Programma sperimentale

La procedura sperimentata si articola di alcuni passaggi pratici atti ad individuare i vuoti residui nelle miscele indagate tramite raffronto dello stesso materiale precedentemente all'estrazione di bitume e successivamente. Segue una presentazione dettagliate delle stesse.

Il primo step per ogni materiale è stato quello della pulizia dal materiale troppo fine (filler, passante al setaccio 0.063 mm) tramite lavaggio. Successivamente si è eseguita l'analisi granulometrica e le miscele sono state spezzate in due curve con passante al setaccio con apertura 5 mm e trattenuto, privato della frazione trattenuta al 20 mm. In pratica si sono formate le classi 5-20 e 0-5 con materiali "troppo fino" e "troppo grosso" scartati. Fatto ciò, per ogni classe si sono indagate le masse volumiche tramite picnometro sottovuoto. Una volta asciutte le due frazioni sono state spogliate del bitume tramite estrazione: questa operazione permette sia di ricavare la percentuale di bitume per ognuna delle due classi, sia di ripetere gli step precedenti sugli aggregati liberati dal rivestimento bituminoso. Vengono cioè ripetute granulometria e masse volumiche al fine di confrontare i valori ottenuti con quelli relativi all'aggregato nero.

Si ricava la massa volumica massima, cioè quella massa volumica che idealmente si avrebbe in assenza di vuoti e si paragona a quella che effettivamente si ha sul fresato in questione. La differenza è data proprio dai vuoti residui interni ai grumi della miscela.

Capitolo 4

Risultati della sperimentazione

Di seguito sono riportati di seguito i risultati ottenuti applicando le procedure descritte nel capitolo 3 alle sei miscele di fresato indagate.

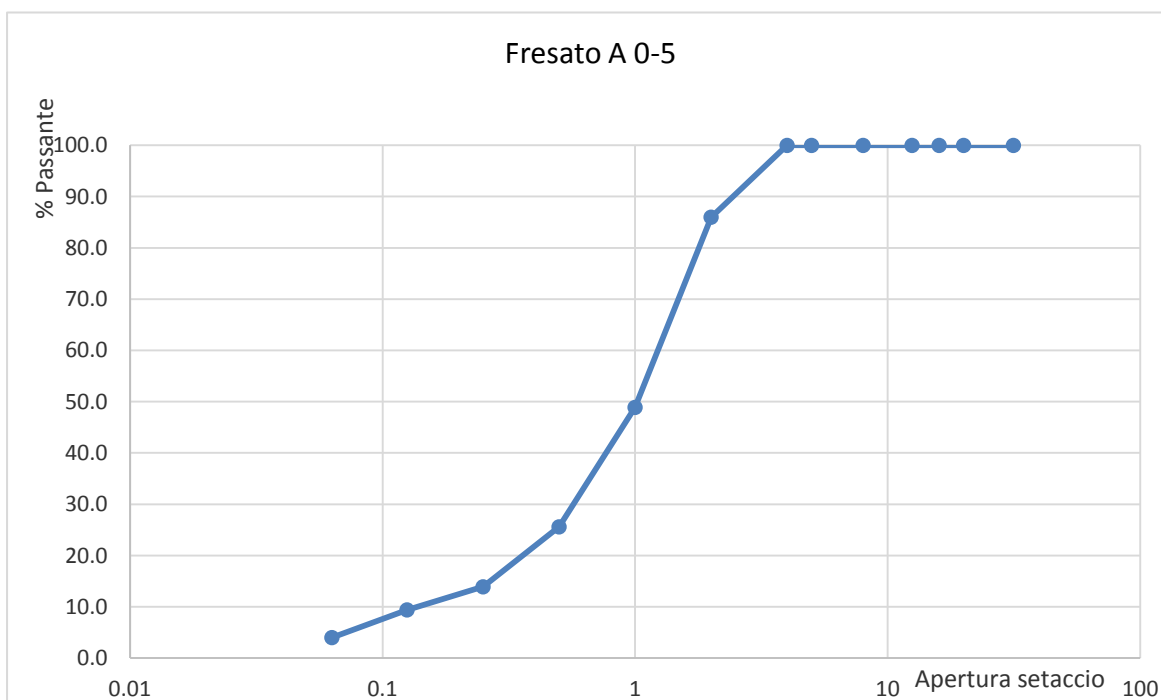
4.1 Analisi granulometrica pre-estrazione di bitume

Fresato A

Frazione 0-5

Campione	Fresato A 0-5			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	316.9	14.0	14.0	86.0
2	840.3	37.1	51.1	48.9
1	526.9	23.3	74.4	25.6
0.5	264.5	11.7	86.1	13.9
0.25	101.5	4.5	90.6	9.4
0.125	123.4	5.4	96.0	4.0
0.063	59.2	2.6	98.6	1.4
FONDO	31.7	1.4		

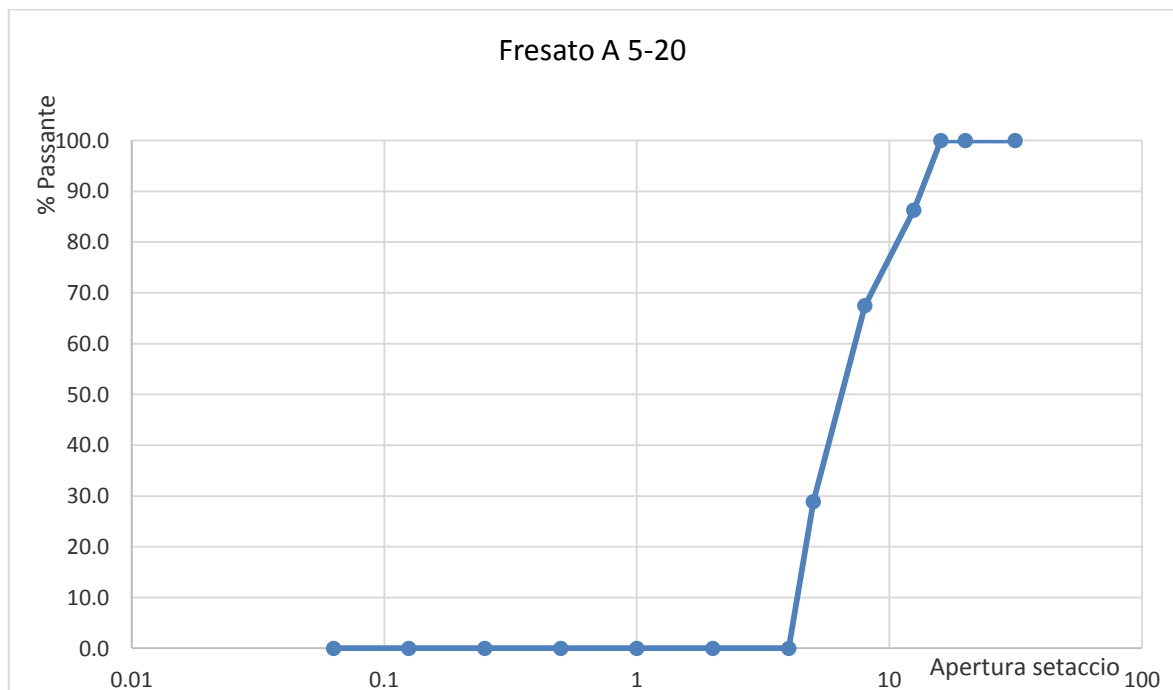
Peso totale Inerte	2264.4
--------------------	--------



Frazione 5-20

Campione	Fresato A 5-20			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	397.2	13.7	13.7	86.3
12.5	545.5	18.8	32.5	67.5
8	1119.2	38.6	71.1	28.9
5	838.8	28.9	100.0	0.0
4		0.0	100.0	0.0
2		0.0	100.0	0.0
1		0.0	100.0	0.0
0.5		0.0	100.0	0.0
0.25		0.0	100.0	0.0
0.125		0.0	100.0	0.0
0.063		0.0	100.0	0.0
FONDO		0.0		

Peso totale Inerte	2900.7
--------------------	--------

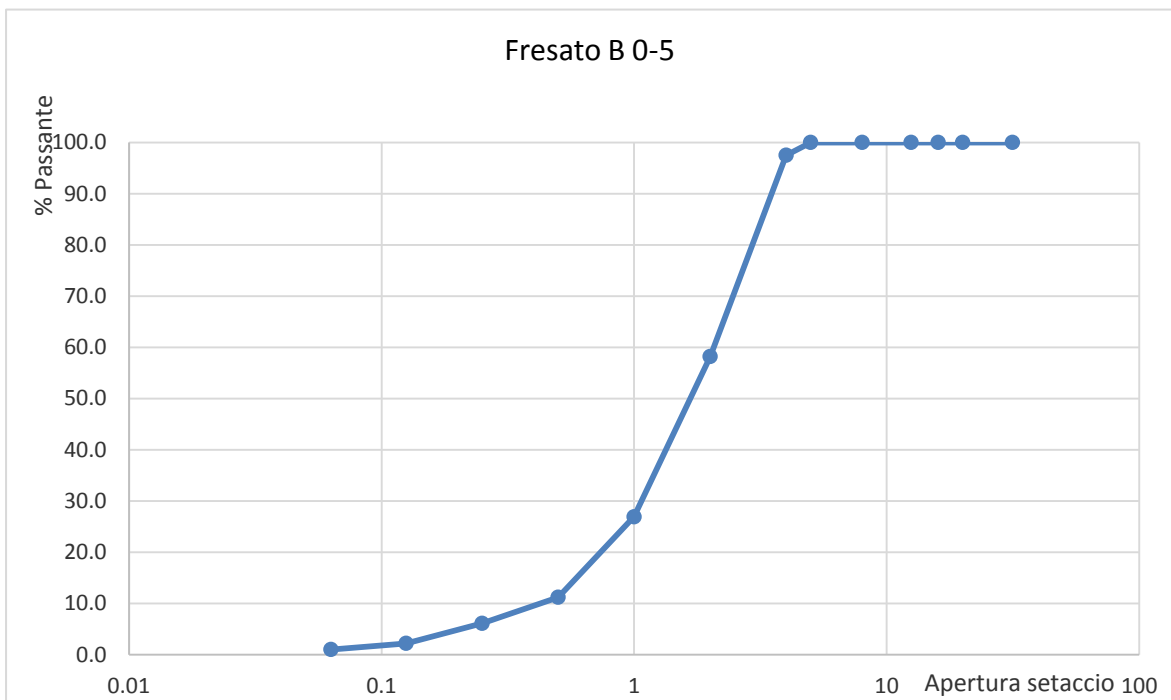


Fresato B

Frazione 0-5

Campione	Fresato B 0-5			
Setaccio/cravello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	61.8	2.5	2.5	97.5
2	986.9	39.3	41.8	58.2
1	786.1	31.3	73.1	26.9
0.5	394	15.7	88.8	11.2
0.25	129	5.1	93.9	6.1
0.125	97.3	3.9	97.8	2.2
0.063	29.6	1.2	99.0	1.0
FONDO	28.4	1.1		

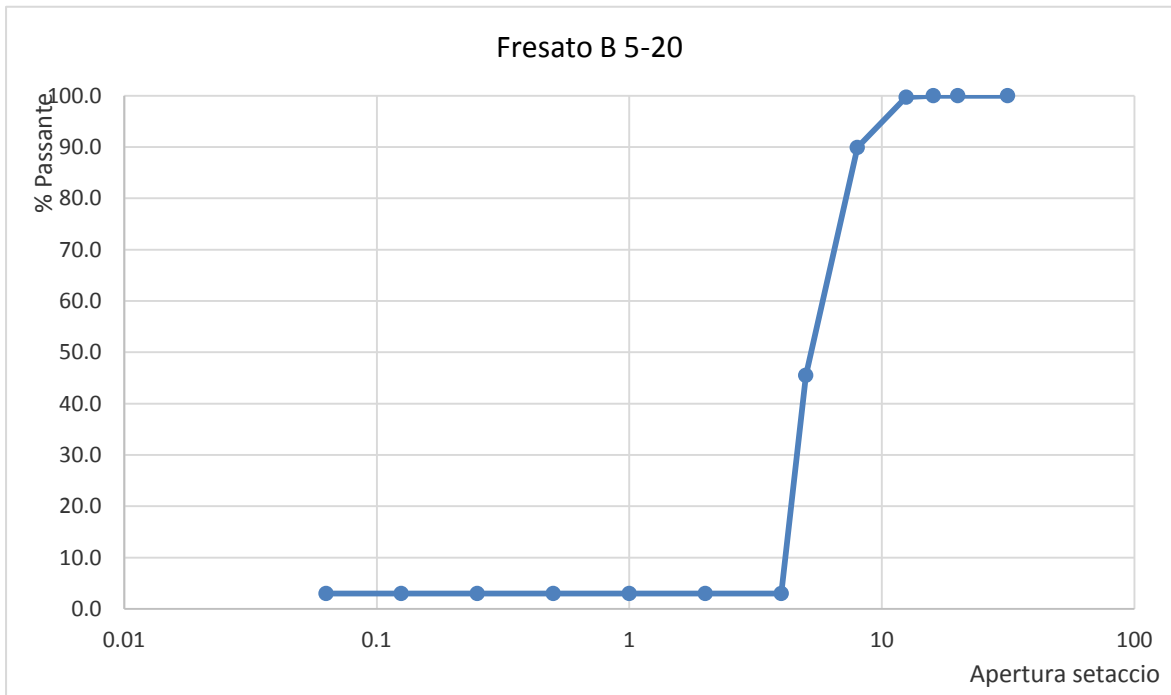
Peso totale Inerte	2513.3
--------------------	--------



Frazione 5-20

Campione	Fresato B 5-20			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	7.7	0.3	0.3	99.7
12.5	229.7	9.8	10.1	89.9
8	1038.8	44.4	54.5	45.5
5	994.8	42.5	97.0	3.0
4	0	0.0	97.0	3.0
2	0	0.0	97.0	3.0
1	0	0.0	97.0	3.0
0.5	0	0.0	97.0	3.0
0.25	0	0.0	97.0	3.0
0.125	0	0.0	97.0	3.0
0.063	0	0.0	97.0	3.0
FONDO	67.4	2.9		

Peso totale Inerte	2338.4
--------------------	--------

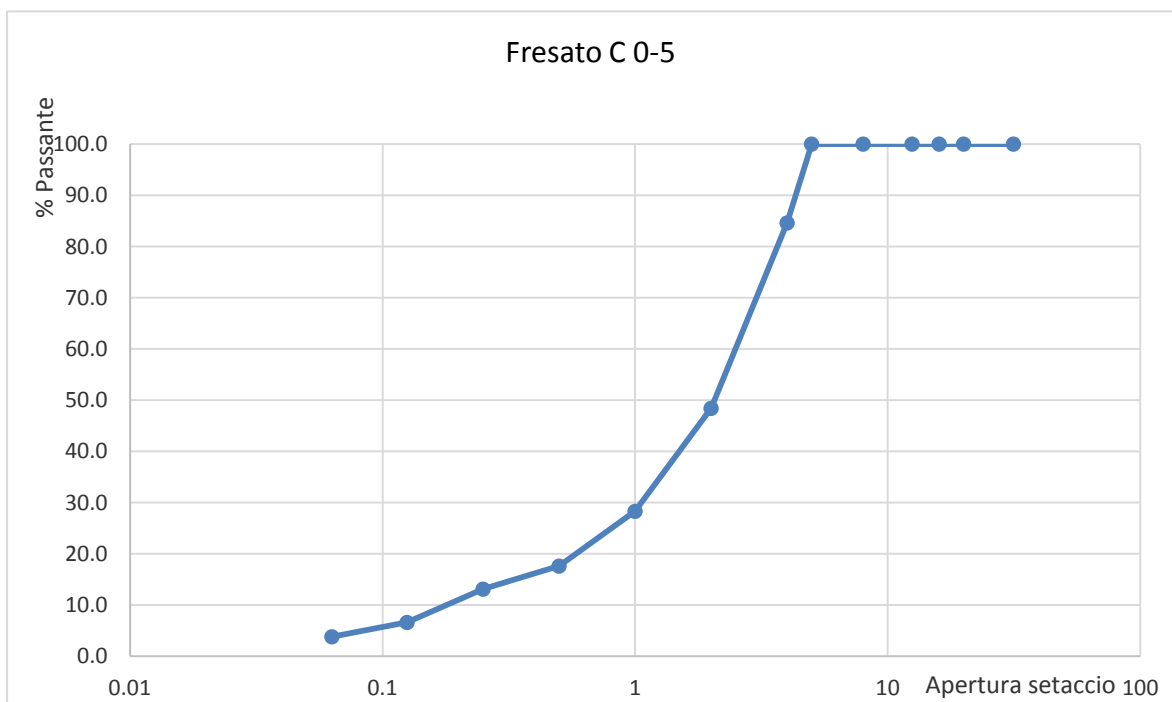


Fresato C

Frazione 0-5

Campione	Fresato C 0-5			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	334.2	15.4	15.4	84.6
2	783.9	36.2	51.6	48.4
1	434.7	20.1	71.7	28.3
0.5	233	10.7	82.4	17.6
0.25	96.7	4.5	86.9	13.1
0.125	140.8	6.5	93.4	6.6
0.063	59.9	2.8	96.2	3.8
FONDO	82.6	3.8		

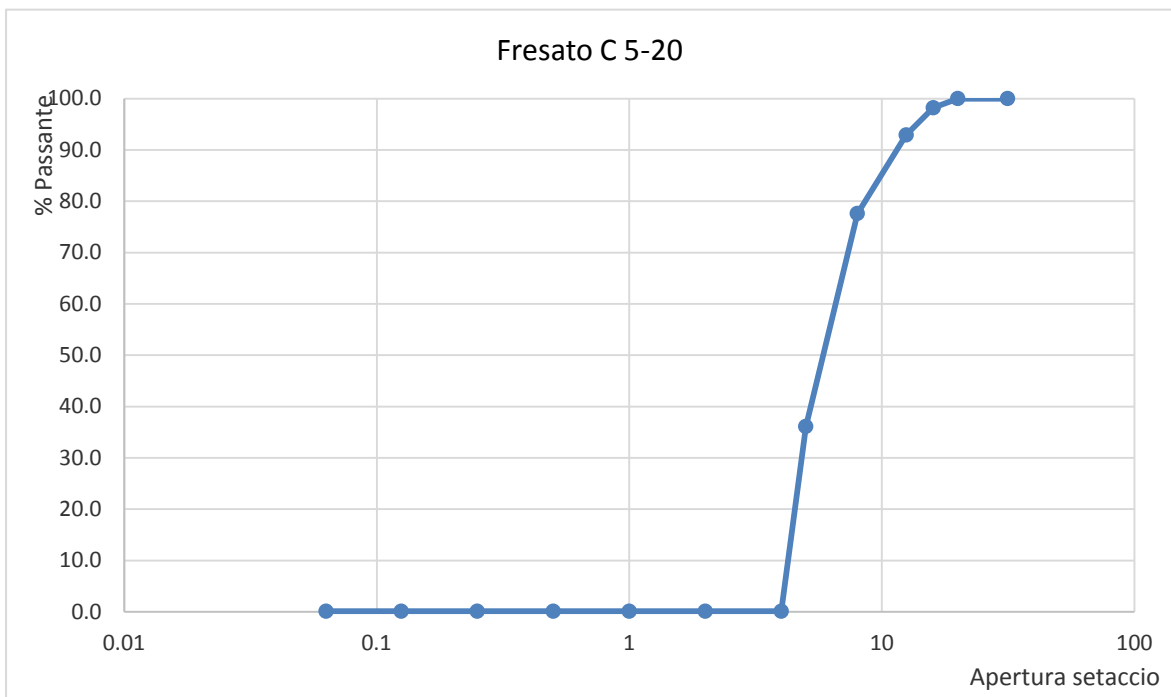
Peso totale Inerte	2165.3
--------------------	--------



Frazione 5-20

Campione	Fresato C 5-20			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	49.6	1.8	1.8	98.2
16	147.7	5.3	7.1	92.9
12.5	423.5	15.3	22.4	77.6
8	1147.4	41.5	63.9	36.1
5	994.8	36.0	99.9	0.1
4	0	0.0	99.9	0.1
2	0	0.0	99.9	0.1
1	0	0.0	99.9	0.1
0.5	0	0.0	99.9	0.1
0.25	0	0.0	99.9	0.1
0.125	0	0.0	99.9	0.1
0.063	0	0.0	99.9	0.1
FONDO	0	0.0		

Peso totale Inerte	2763
--------------------	------

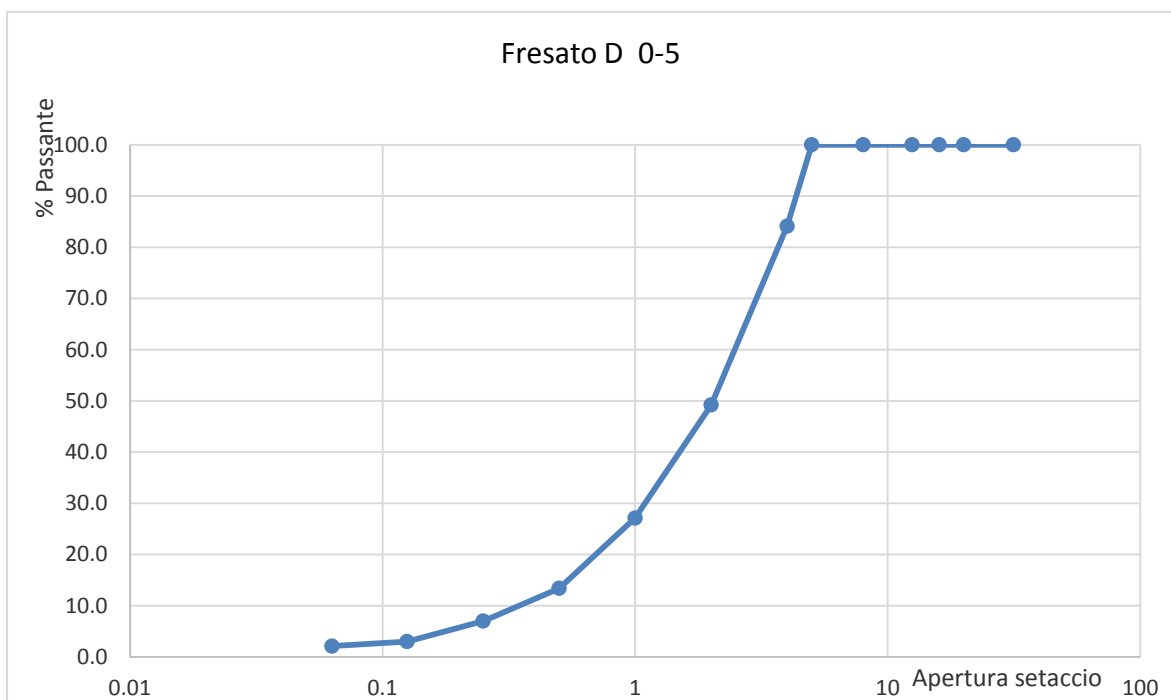


Fresato D

Frazione 0-5

Campione	Fresato D 0-5			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	236.3	15.9	15.9	84.1
2	517.4	34.9	50.8	49.2
1	327.4	22.1	72.9	27.1
0.5	203	13.7	86.6	13.4
0.25	95.2	6.4	93.0	7.0
0.125	59.1	4.0	97.0	3.0
0.063	13.8	0.9	97.9	2.1
FONDO	31.3	2.1		

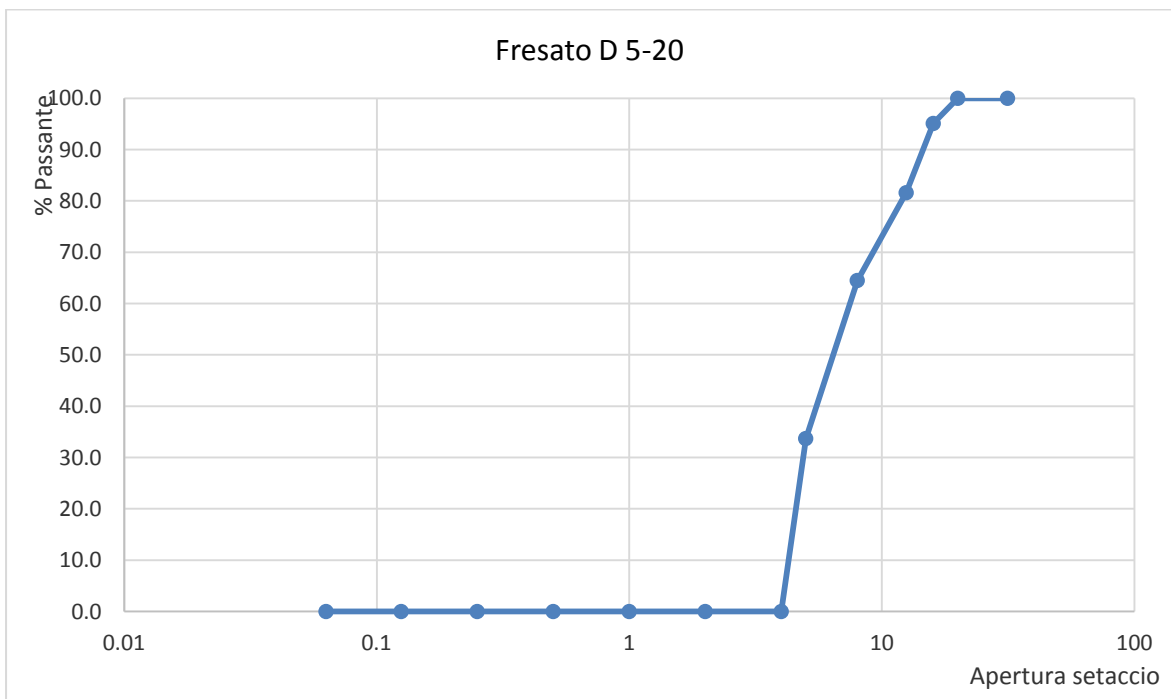
Peso totale Inerte	1483.5
--------------------	--------



Frazione 5-20

Campione	Fresato D 5-20			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	95.2	4.9	4.9	95.1
16	262.1	13.5	18.4	81.6
12.5	333.6	17.1	35.5	64.5
8	599.4	30.8	66.3	33.7
5	656.3	33.7	100.0	0.0
4	0	0.0	100.0	0.0
2	0	0.0	100.0	0.0
1	0	0.0	100.0	0.0
0.5	0	0.0	100.0	0.0
0.25	0	0.0	100.0	0.0
0.125	0	0.0	100.0	0.0
0.063	0	0.0	100.0	0.0
FONDO	0	0.0		

Peso totale Inerte	1946.6
--------------------	--------

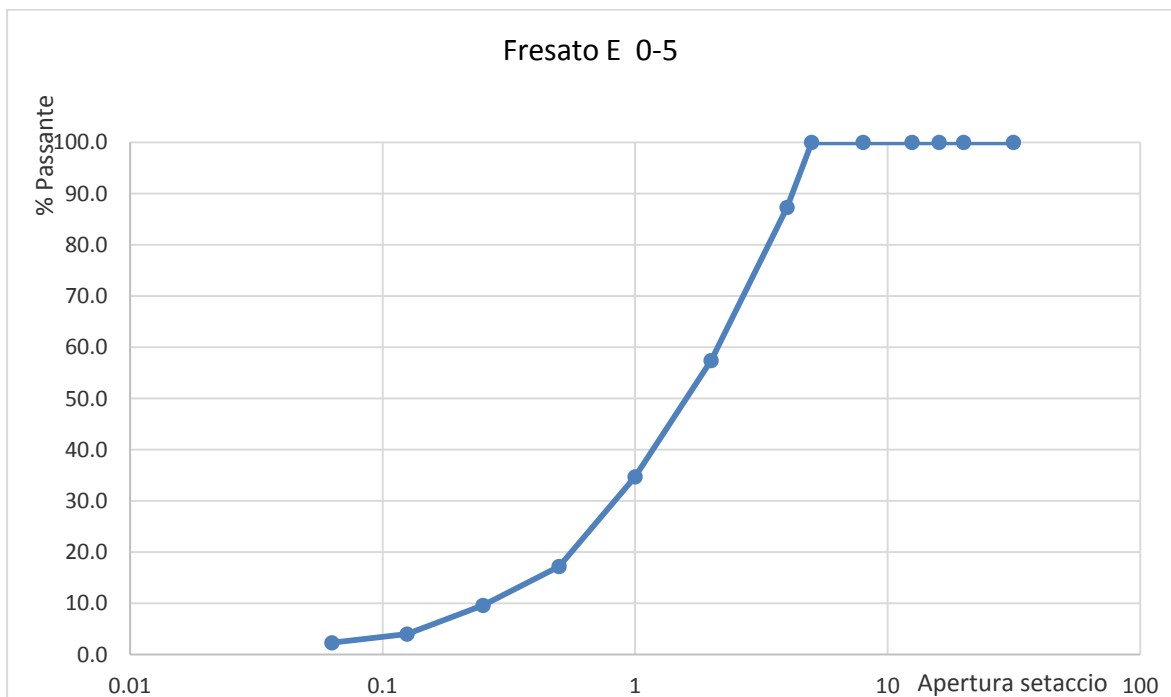


Fresato E

Frazione 0-5

Campione	Fresato E 0-5			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	234.9	12.7	12.7	87.3
2	551.5	29.9	42.6	57.4
1	419.2	22.7	65.3	34.7
0.5	324	17.5	82.8	17.2
0.25	139.6	7.6	90.4	9.6
0.125	104.1	5.6	96.0	4.0
0.063	31	1.7	97.7	2.3
FONDO	42.9	2.3		

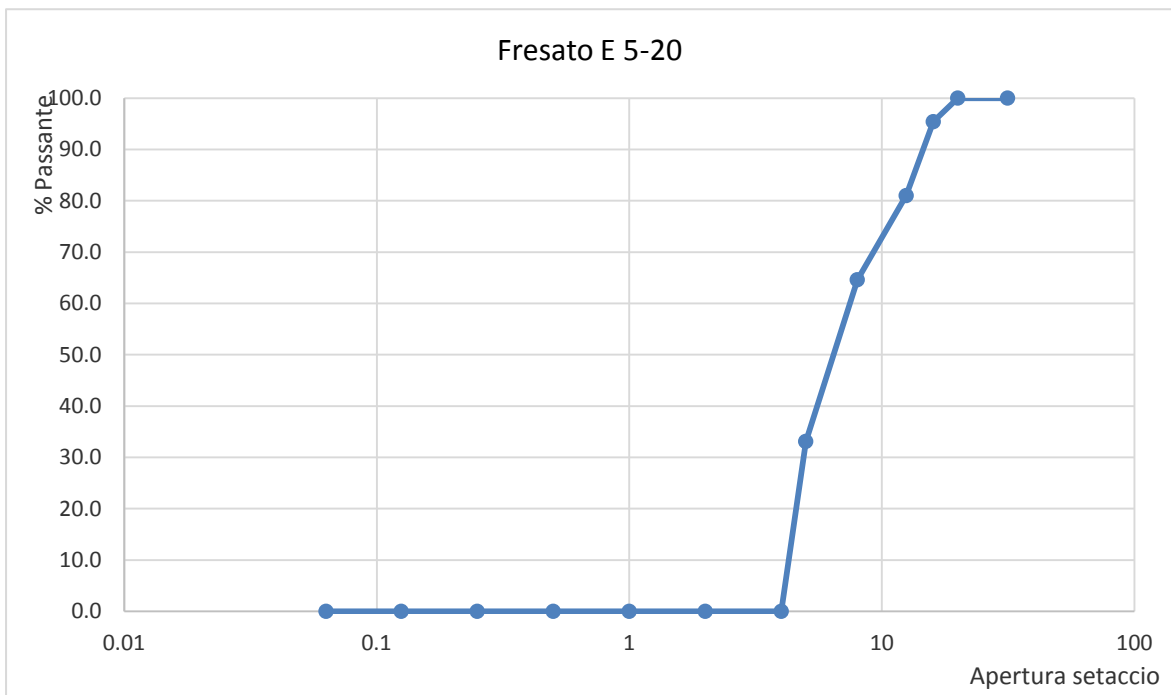
Peso totale Inerte	1847.1
--------------------	--------



Frazione 5-20

Campione	Fresato E 5-20			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	76.7	4.6	4.6	95.4
16	242.8	14.4	19.0	81.0
12.5	276.1	16.4	35.4	64.6
8	530.7	31.5	66.9	33.1
5	556.4	33.1	100.0	0.0
4	0	0.0	100.0	0.0
2	0	0.0	100.0	0.0
1	0	0.0	100.0	0.0
0.5	0	0.0	100.0	0.0
0.25	0	0.0	100.0	0.0
0.125	0	0.0	100.0	0.0
0.063	0	0.0	100.0	0.0
FONDO	0	0.0		

Peso totale Inerte	1682.7
--------------------	--------

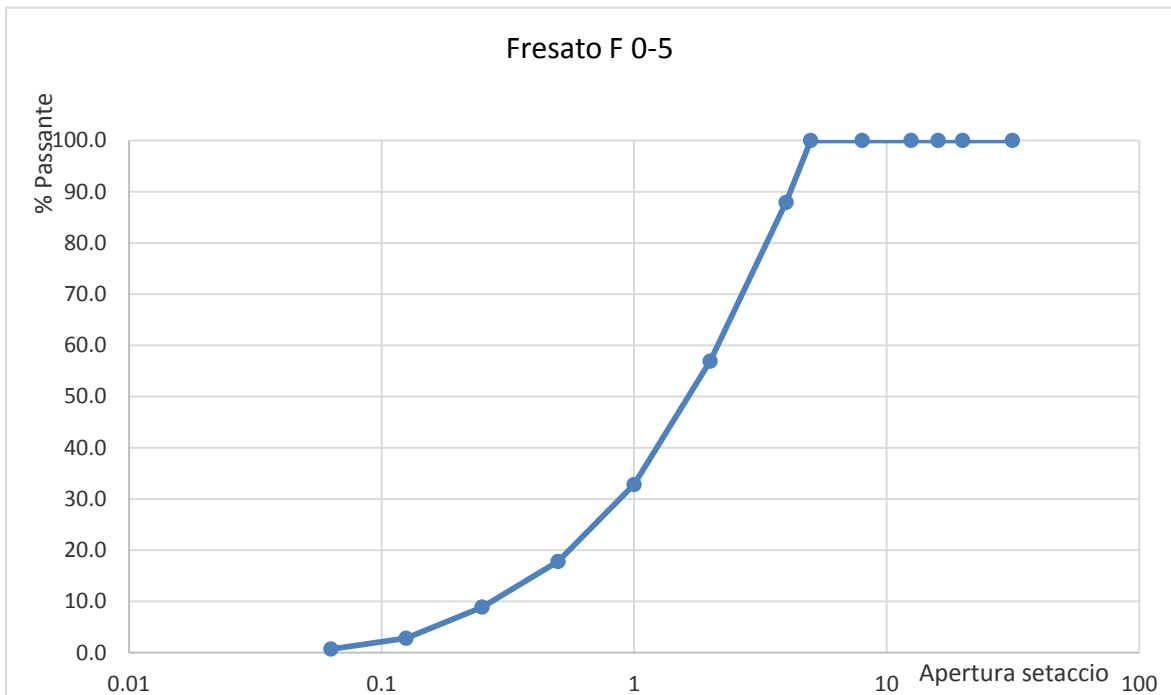


Fresato F

Frazione 0-5

Campione	Fresato F 0-5			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	349.4	12.1	12.1	87.9
2	895.8	31.0	43.1	56.9
1	697	24.1	67.2	32.8
0.5	435.2	15.0	82.2	17.8
0.25	258.5	8.9	91.1	8.9
0.125	176	6.1	97.2	2.8
0.063	60.5	2.1	99.3	0.7
FONDO	20.2	0.7		

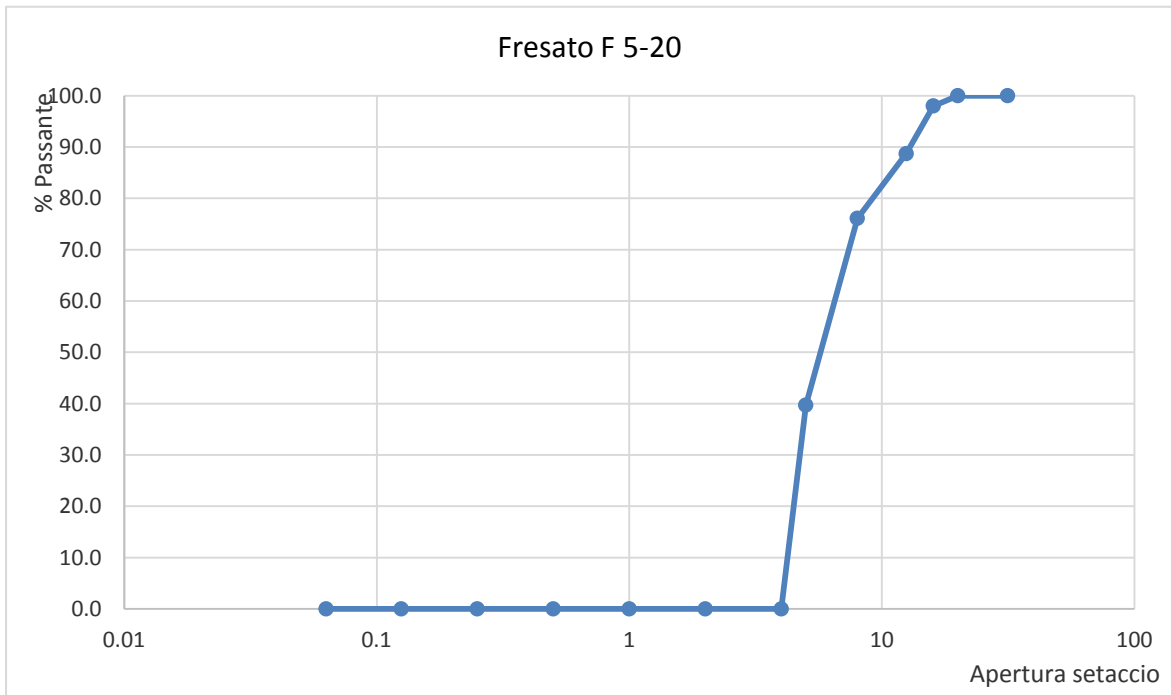
Peso totale Inerte	2892.6
--------------------	--------



Frazione 5-20

Campione	Fresato F 5-20			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	46.1	2.0	2.0	98.0
16	217.7	9.3	11.3	88.7
12.5	295.3	12.6	23.9	76.1
8	854.6	36.4	60.3	39.7
5	933.9	39.8	100.1	0
4	0	0.0	100.1	0
2	0	0.0	100.1	0
1	0	0.0	100.1	0
0.5	0	0.0	100.1	0
0.25	0	0.0	100.1	0
0.125	0	0.0	100.1	0
0.063	0	0.0	100.1	0
FONDO	0	0.0		

Peso totale Inerte	2347.6
--------------------	--------



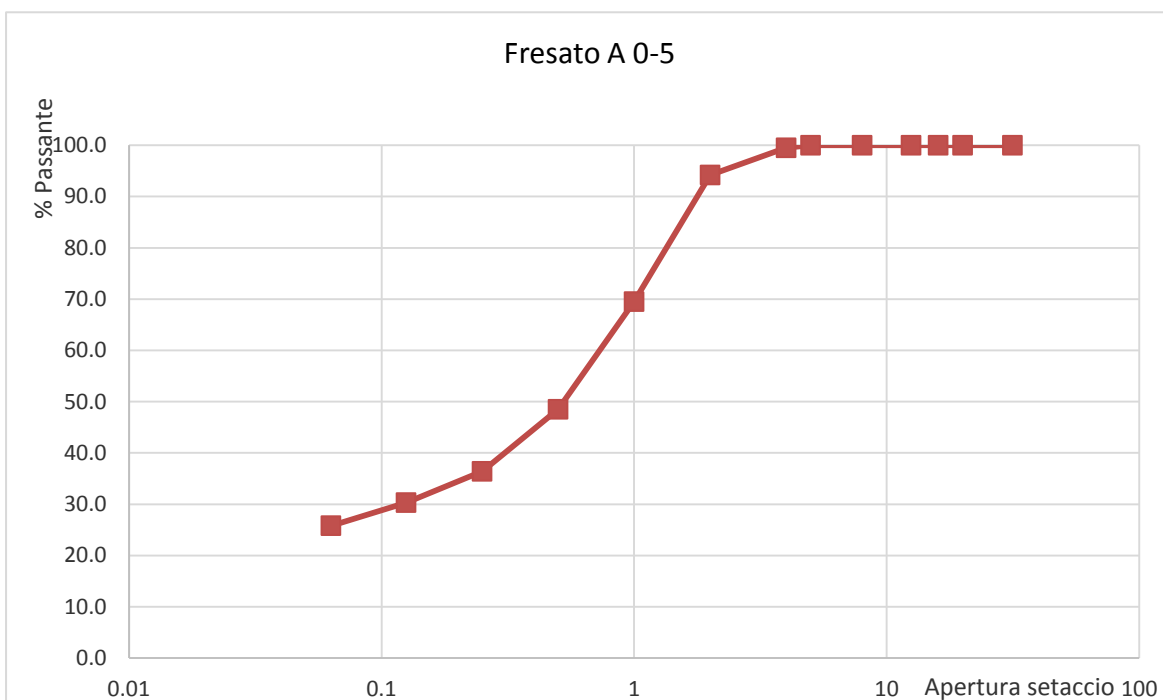
4.2 Analisi granulometrica post-estrazione di bitume

Fresato A

Frazione 0-5

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	5	0.5	0.5	99.5
4	53	5.3	5.8	94.2
2	244.9	24.7	30.5	69.5
1	208.1	21.0	51.5	48.5
0.5	120.1	12.1	63.6	36.4
0.25	60.3	6.1	69.7	30.3
0.125	44.8	4.5	74.2	25.8
0.063	27.5	2.8	77.0	23.0
FONDO	228.6	23.0		

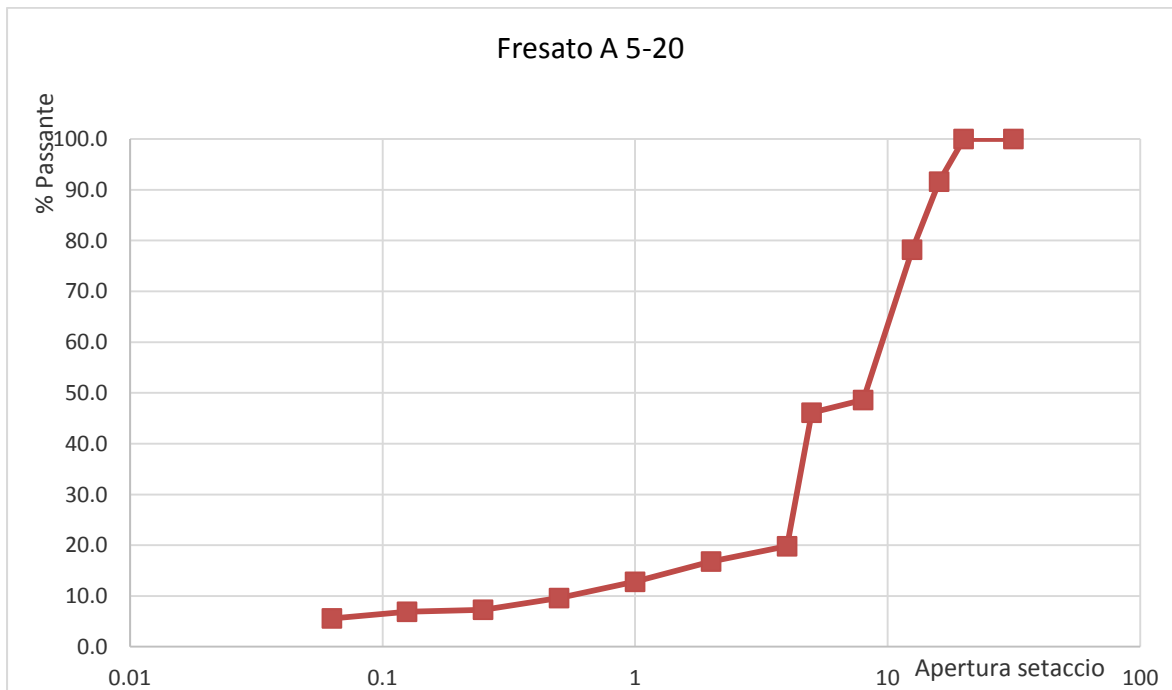
Peso totale Inerte	992.3
--------------------	-------



Frazione 5-20

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	82.8	8.4	8.4	91.6
16	132.4	13.4	21.8	78.2
12.5	292.5	29.6	51.4	48.6
8	24.6	2.5	53.9	46.1
5	260	26.3	80.2	19.8
4	30.1	3.0	83.2	16.8
2	39.9	4.0	87.2	12.8
1	31.3	3.2	90.4	9.6
0.5	23	2.3	92.7	7.3
0.25	4.4	0.4	93.1	6.9
0.125	13.1	1.3	94.4	5.6
0.063	6.8	0.7	95.1	4.9
FONDO	48.9	4.9		

Peso totale Inerte	989.8
--------------------	-------

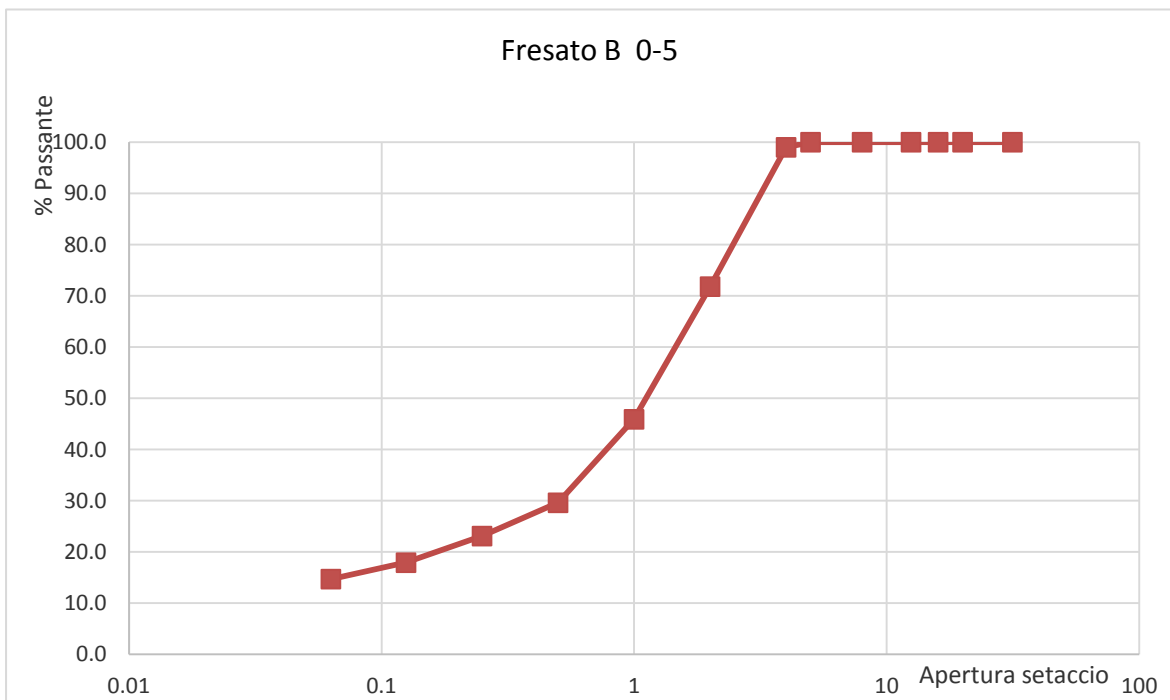


Fresato B

Frazione 0-5

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	8.9	1.0	1.0	99.0
2	246.7	27.2	28.2	71.8
1	234.9	25.9	54.1	45.9
0.5	148.2	16.3	70.4	29.6
0.25	59	6.5	76.9	23.1
0.125	47.1	5.2	82.1	17.9
0.063	29.1	3.2	85.3	14.7
FONDO	133.7	14.7		

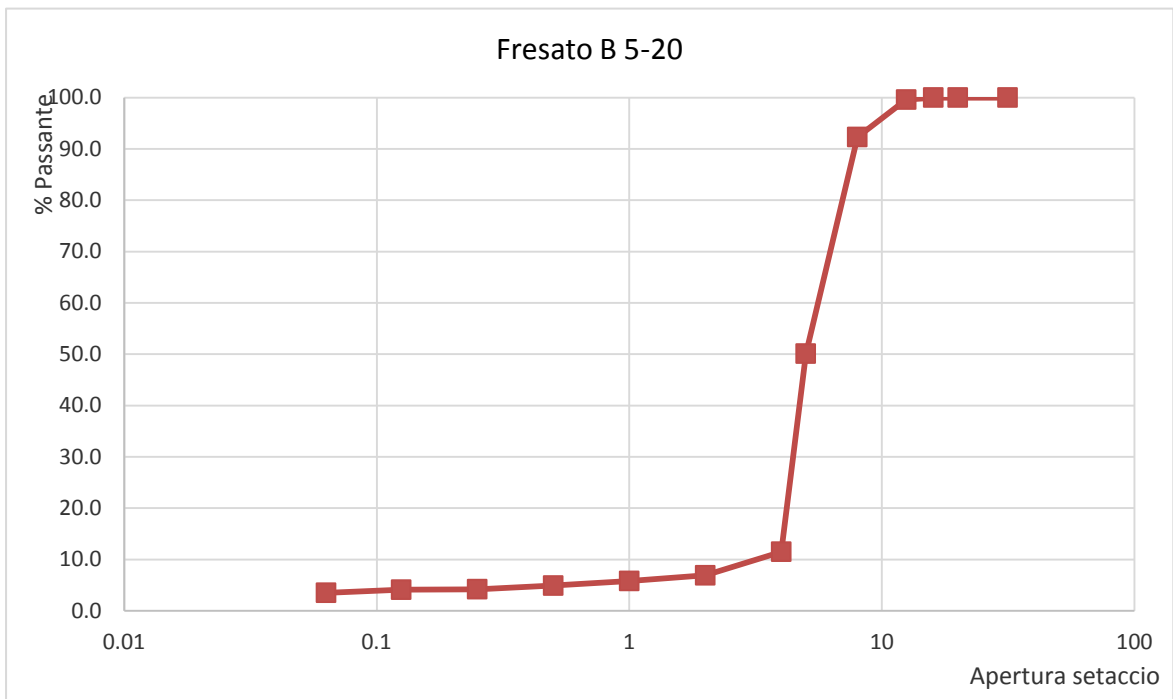
Peso totale Inerte	907.6
--------------------	-------



Frazione 5-20

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	3.9	0.4	0.4	99.6
12.5	66.8	7.3	7.7	92.3
8	385.3	42.2	49.9	50.1
5	352.4	38.6	88.5	11.5
4	41.9	4.6	93.1	6.9
2	10.3	1.1	94.2	5.8
1	8.6	0.9	95.1	4.9
0.5	6.2	0.7	95.8	4.2
0.25	1.3	0.1	95.9	4.1
0.125	5.5	0.6	96.5	3.5
0.063	4.9	0.5	97.0	3.0
FONDO	26.6	2.9		

Peso totale Inerte	913.7
--------------------	-------

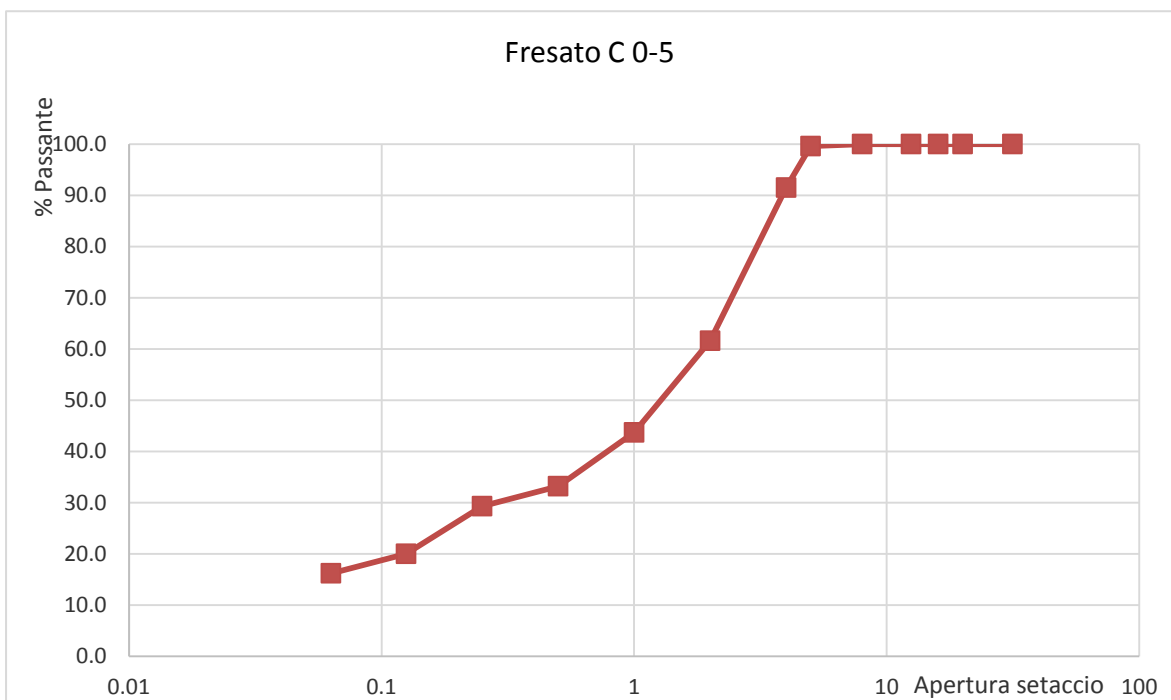


Fresato C

Frazione 0-5

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	3.5	0.4	0.4	99.6
4	79.2	8.1	8.5	91.5
2	290.9	29.9	38.4	61.6
1	174.1	17.9	56.3	43.7
0.5	101.9	10.5	66.8	33.2
0.25	38	3.9	70.7	29.3
0.125	90.8	9.3	80.0	20.0
0.063	37.2	3.8	83.8	16.2
FONDO	158	16.2		

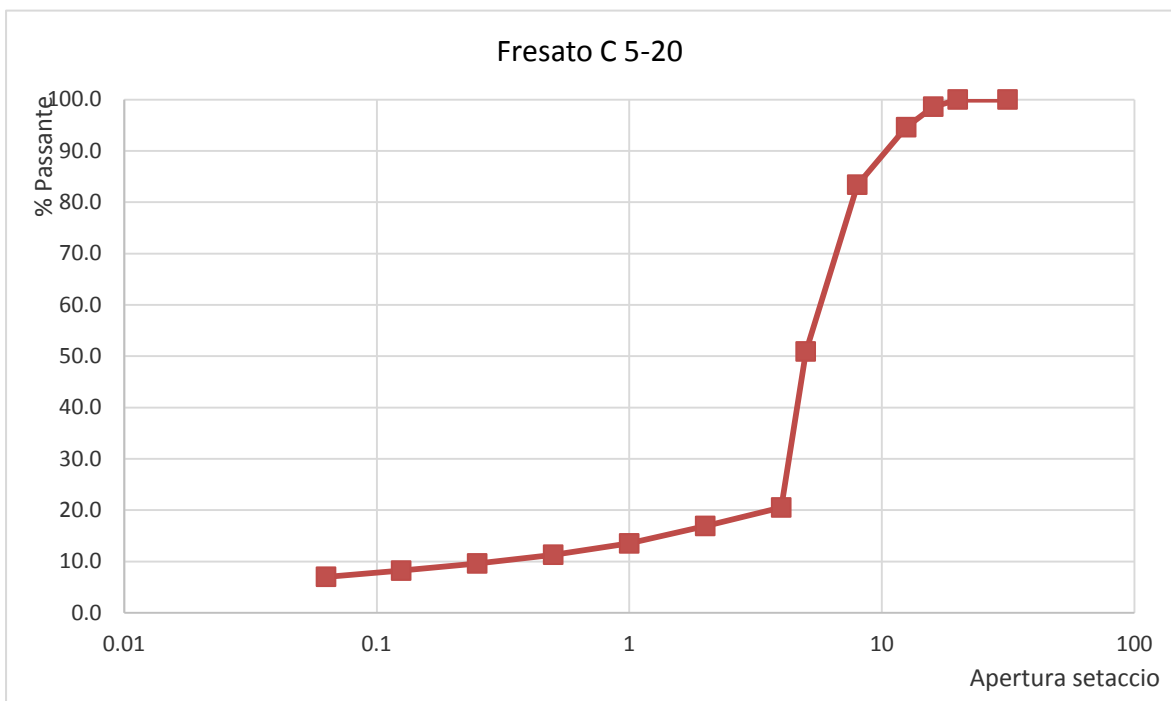
Peso totale Inerte	973.6
--------------------	-------



Frazione 5-20

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	14.8	1.4	1.4	98.6
16	41.6	4.0	5.4	94.6
12.5	117.3	11.2	16.6	83.4
8	339.7	32.5	49.1	50.9
5	317.3	30.4	79.5	20.5
4	38	3.6	83.1	16.9
2	35.9	3.4	86.5	13.5
1	23.1	2.2	88.7	11.3
0.5	17.5	1.7	90.4	9.6
0.25	14.8	1.4	91.8	8.2
0.125	12.7	1.2	93.0	7.0
0.063	12.2	1.2	94.2	5.8
FONDO	59.2	5.7		

Peso totale Inerte	1044.1
--------------------	--------

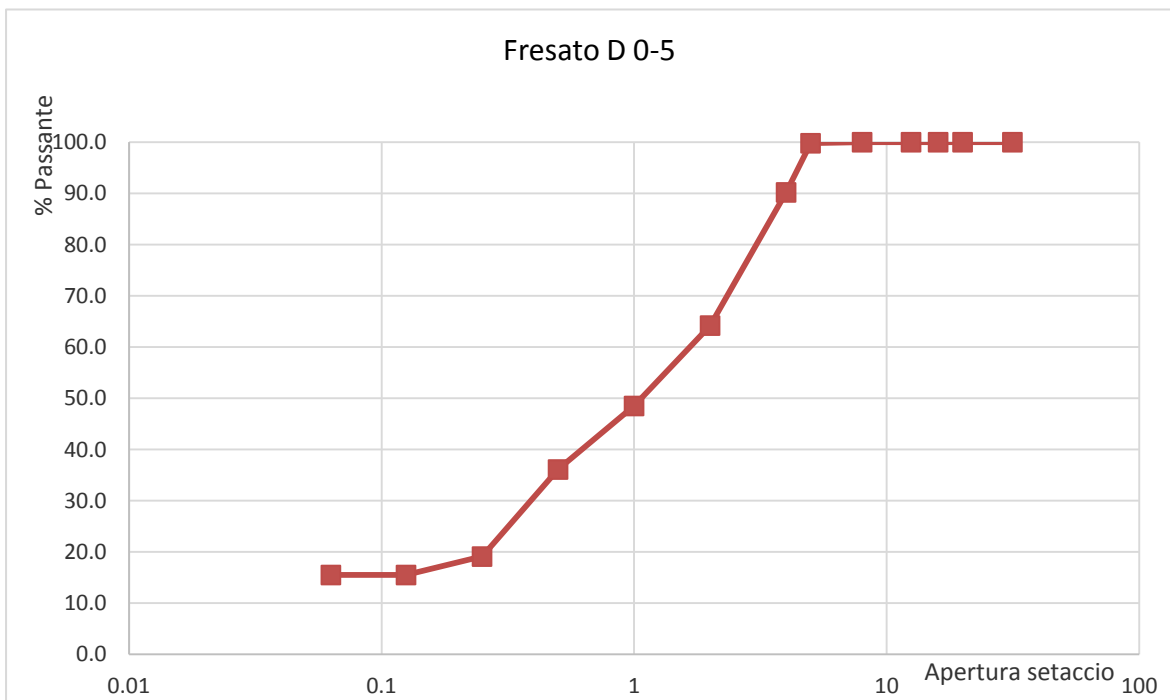


Fresato D

Frazione 0-5

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	1.3	0.2	0.2	99.8
4	82.8	9.6	9.8	90.2
2	225	26.0	35.8	64.2
1	136.4	15.7	51.5	48.5
0.5	107.8	12.4	63.9	36.1
0.25	146.9	17.0	80.9	19.1
0.125	30.9	3.6	84.5	15.5
0.063	0	0.0	84.5	15.5
FONDO	135	15.6		

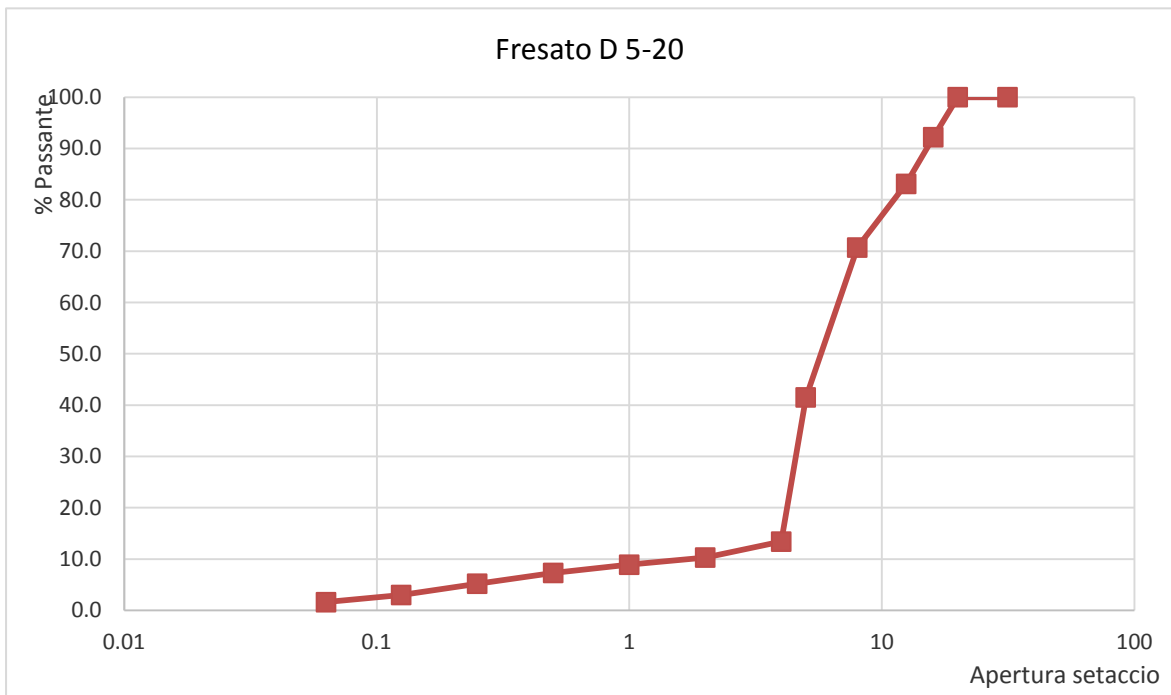
Peso totale Inerte 866.1



Frazione 5-20

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	77.3	7.8	7.8	92.2
16	91.1	9.1	16.9	83.1
12.5	123.7	12.4	29.3	70.7
8	291.4	29.2	58.5	41.5
5	280.6	28.1	86.6	13.4
4	31.4	3.1	89.7	10.3
2	14.4	1.4	91.1	8.9
1	16.2	1.6	92.7	7.3
0.5	21.4	2.1	94.8	5.2
0.25	22.2	2.2	97.0	3.0
0.125	14.2	1.4	98.4	1.6
0.063	11	1.1	99.5	0.5
FONDO	2.3	0.2		

Peso totale Inerte	997.2
--------------------	-------

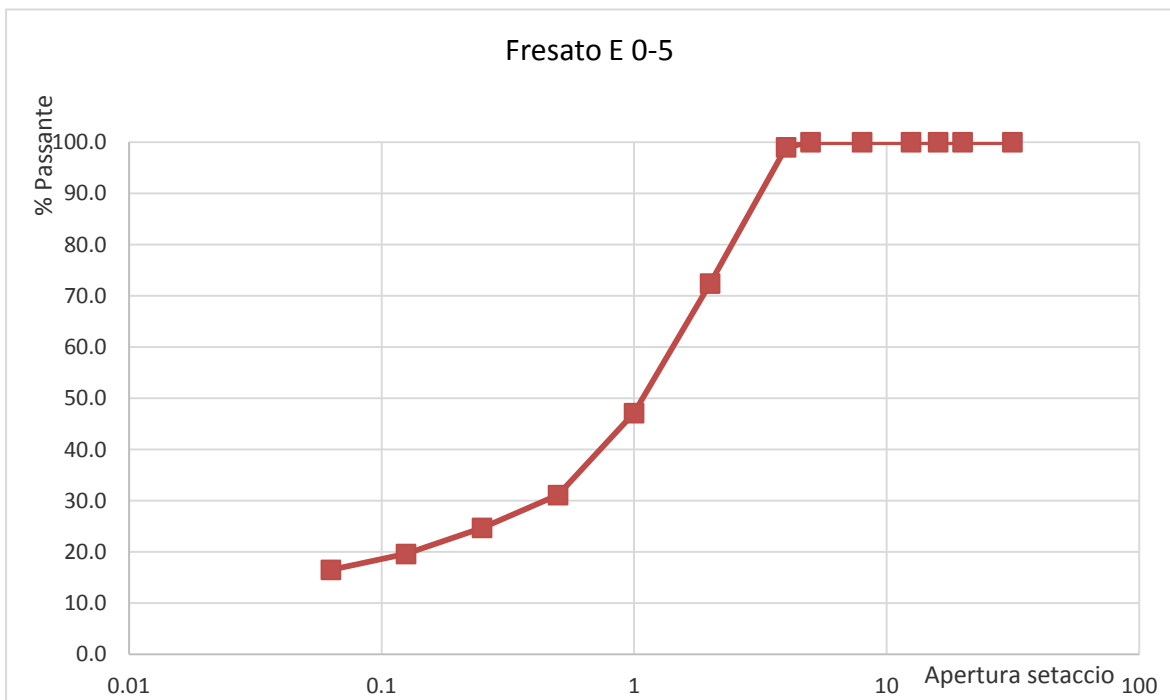


Fresato E

Frazione 0-5

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	8.9	1.0	1.0	99.0
2	246.7	26.6	27.6	72.4
1	234.9	25.3	52.9	47.1
0.5	148.2	16.0	68.9	31.1
0.25	59	6.4	75.3	24.7
0.125	47.1	5.1	80.4	19.6
0.063	29.1	3.1	83.5	16.5
FONDO	153.5	16.6		

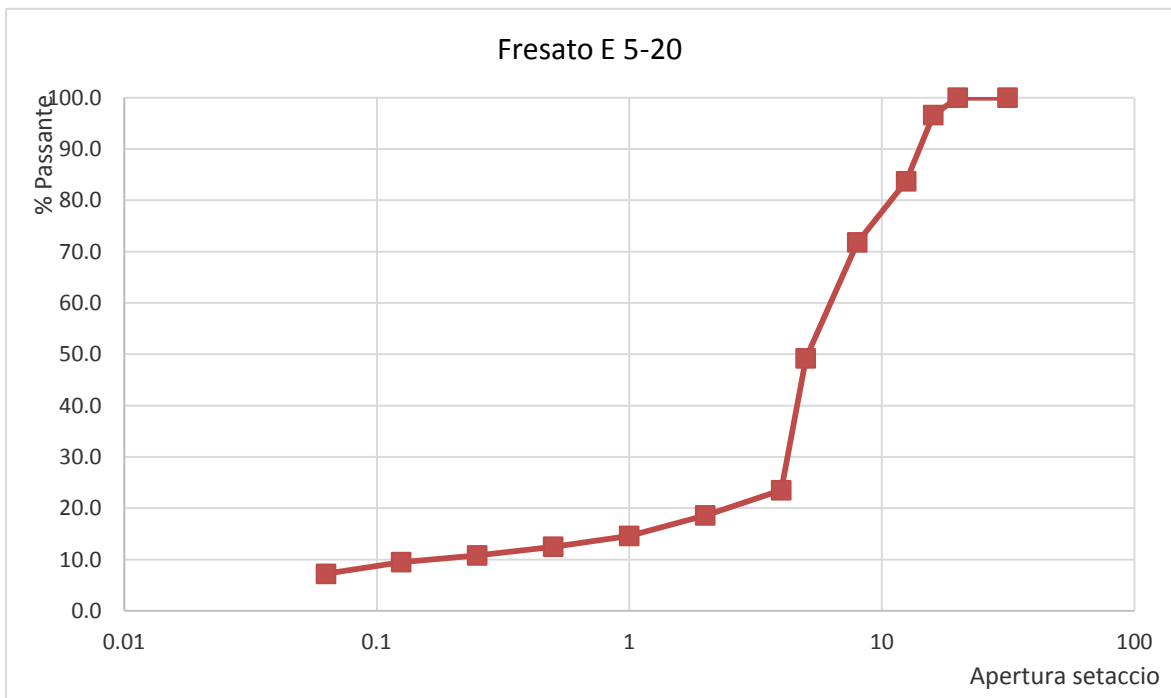
Peso totale Inerte	927.4
--------------------	-------



Frazione 5-20

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	26.5	3.4	3.4	96.6
16	100.8	12.9	16.3	83.7
12.5	93.3	11.9	28.2	71.8
8	176.7	22.6	50.8	49.2
5	201.2	25.7	76.5	23.5
4	38.5	4.9	81.4	18.6
2	30.9	4.0	85.4	14.6
1	16.6	2.1	87.5	12.5
0.5	13	1.7	89.2	10.8
0.25	10.5	1.3	90.5	9.5
0.125	17.8	2.3	92.8	7.2
0.063	7	0.9	93.7	6.3
FONDO	49.1	6.3		

Peso totale Inerte	781.9
--------------------	-------

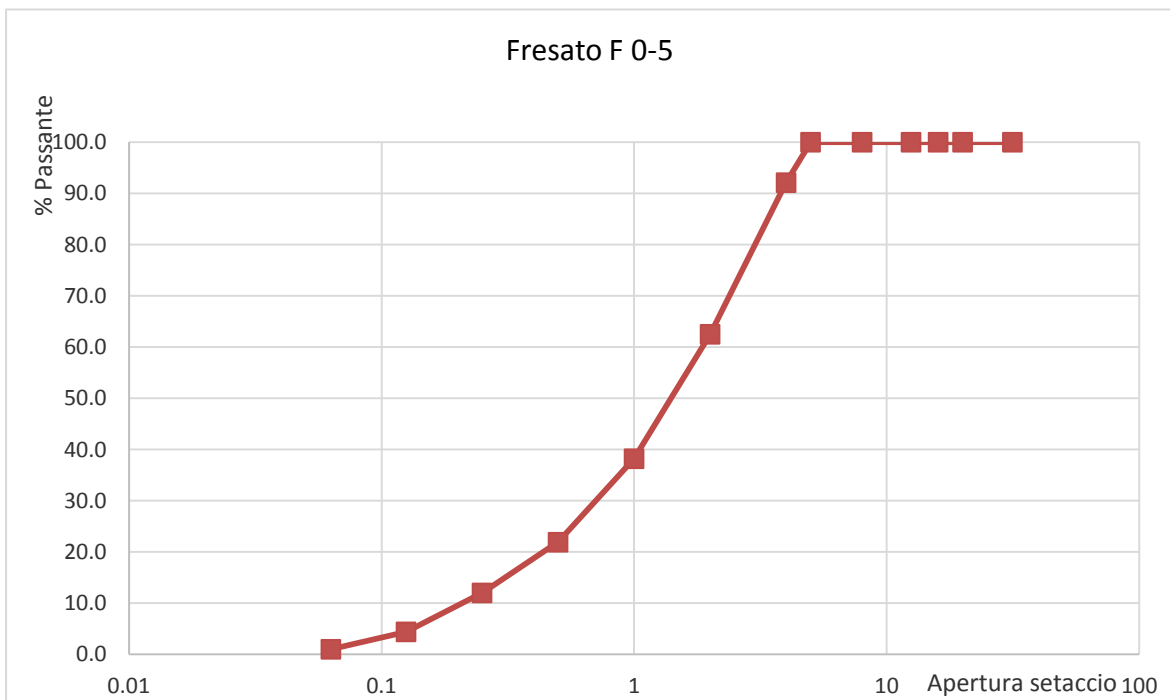


Fresato F

Frazione 0-5

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	100.0
12.5	0	0.0	0.0	100.0
8	0	0.0	0.0	100.0
5	0	0.0	0.0	100.0
4	63.4	7.9	7.9	92.1
2	237.5	29.6	37.5	62.5
1	195	24.3	61.8	38.2
0.5	130.6	16.3	78.1	21.9
0.25	79.4	9.9	88.0	12.0
0.125	60.8	7.6	95.6	4.4
0.063	27	3.4	99.0	1.0
FONDO	8.2	1.0		

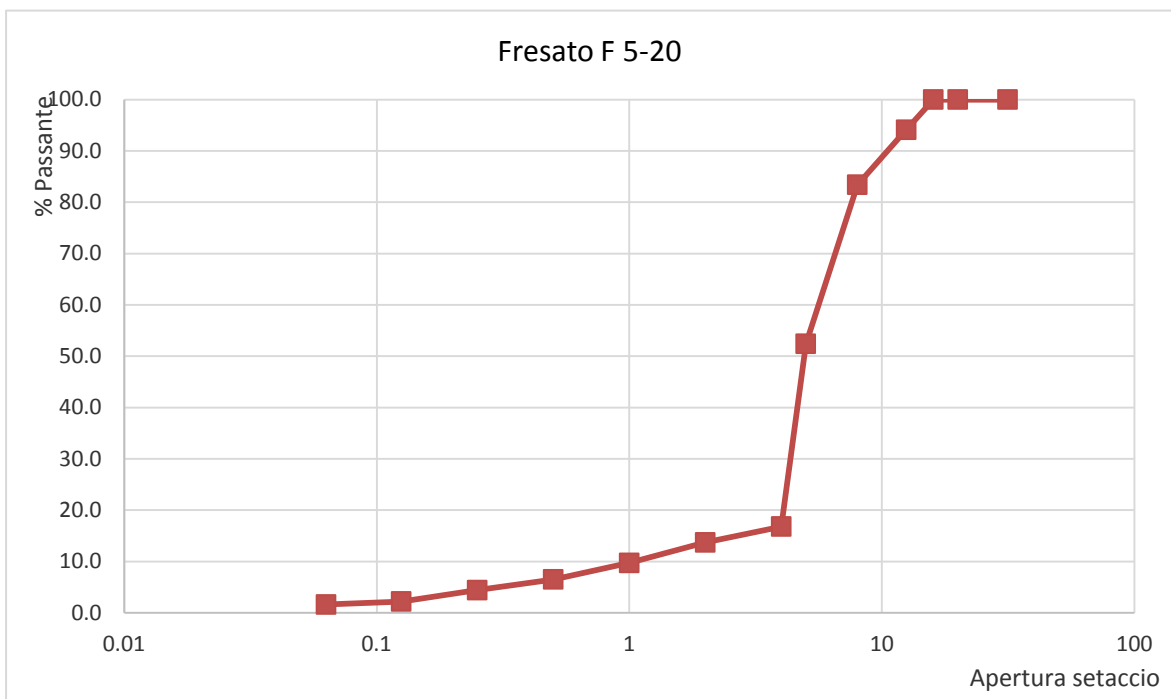
Peso totale Inerte	801.9
--------------------	-------



Frazione 5-20

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0.0	0.0	100.0
31.5		0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	48.7	5.9	5.9	94.1
12.5	88.5	10.7	16.6	83.4
8	256.6	31.0	47.6	52.4
5	294.9	35.6	83.2	16.8
4	26	3.1	86.3	13.7
2	33.1	4.0	90.3	9.7
1	26.3	3.2	93.5	6.5
0.5	17.2	2.1	95.6	4.4
0.25	18.1	2.2	97.8	2.2
0.125	4.9	0.6	98.4	1.6
0.063	11.5	1.4	99.8	0.2
FONDO	2.4	0.3		

Peso totale Inerte	828.2
--------------------	-------



4.3 Masse volumiche pre e post estrazione

Sono riportati in dettaglio i valori delle varie pesate e quindi delle masse volumiche ottenute tramite picnometro. I parametri indicati nelle tabelle sono esplicitati di seguito:

M2	massa del picnometro + aggregato + acqua fino al menisco
M3	massa del picnometro pieno d'acqua (la temperatura dell'acqua non deve differire di 2°C da T1)
M4	massa netta dell'aggregato asciutto post essiccazione nel forno
Mdry	massa lorda letta sulla bilancia degli aggregati in condizione asciutta post essiccazione nel forno
T1	temperatura dell'acqua in corrispondenza della pesata per M2 (22°C±3°C)
tara1	tara della teglia di alluminio
ρ_w	massa volumica dell'acqua a T1
ρ_A	massa volumica apparente dei granuli

Frazione 0-5

Frazione 5-20

Fresato A

	pre	post
M2 [g]	3560.1	3731.6
M3 [g]	3250.4	3251.1
M4 [g]	511.3	760.8
T1 [°C]	23.2	20.4
ρ_w [g/cm ³]	0.99768	0.99822
tara1 [g]	749.1	742.1
Mdry [g]	1260.4	1502.9

ρ_A [g/cm ³]	2.530326	2.709403
-------------------------------	----------	----------

	pre	post
M2 [g]	4418.5	3731.6
M3 [g]	3801.2	3251.1
M4 [g]	1005	760.8
T1 [°C]	22.7	20.4
ρ_w [g/cm ³]	0.99766	0.99822
tara1 [g]	449.1	742.1
Mdry [g]	1454.8	1502.9

ρ_A [g/cm ³]	2.586145	2.689819
-------------------------------	----------	----------

Fresato B

	pre	post
M2 [g]	3548.4	3742.3
M3 [g]	3255	3252
M4 [g]	500.9	769
T1 [°C]	21.5	21.5
ρ_w [g/cm ³]	0.99795	0.99795
tara1 [g]	449.8	797.9
Mdry [g]	950.7	1566.9

ρ_A [g/cm ³]	2.409027	2.753583
-------------------------------	----------	----------

	pre	post
M2 [g]	4256.9	4371.8
M3 [g]	3803.1	3806.1
M4 [g]	737.4	882.8
T1 [°C]	21.5	21.5
ρ_w [g/cm ³]	0.99795	0.99795
tara1 [g]	1087.3	812.1
Mdry [g]	1824.7	1694.9

ρ_A [g/cm ³]	2.594811	2.778273
-------------------------------	----------	----------

Fresato C

	pre	post
M2 [g]	3575.4	3759.7
M3 [g]	3249.6	3250.3
M4 [g]	546.7	812.9
T1 [°C]	24.4	21.1
ρ_w [g/cm ³]	0.99728	0.99807
tara1 [g]	787.6	809.5
Mdry [g]	1334.3	1622.4

ρ_A [g/cm ³]	2.468144	2.673249
-------------------------------	----------	----------

	pre	post
M2 [g]	4338.5	4421.8
M3 [g]	3802	3800.8
M4 [g]	871.1	982.4
T1 [°C]	21.2	20.4
ρ_w [g/cm ³]	0.99804	0.99822
tara1 [g]	749	560.5
Mdry [g]	1620.1	1542.9

ρ_A [g/cm ³]	2.598304	2.713479
-------------------------------	----------	----------

Fresato D

	pre	post
M2 [g]	3545.8	3711.7
M3 [g]	3251.4	3252.1
M4 [g]	500	727.9
T1 [°C]	21.2	21.3
ρ_w [g/cm ³]	0.99804	0.99801
tara1 [g]	787.8	742.5
Mdry [g]	1287.8	1470.4

ρ_A [g/cm ³]	2.42714	2.707609
-------------------------------	---------	----------

	pre	post
M2 [g]	4304.8	4428.4
M3 [g]	3802.8	3801.6
M4 [g]	815.8	991.4
T1 [°C]	20	21.3
ρ_w [g/cm ³]	0.9983	0.99801
tara1 [g]	796.3	749.1
Mdry [g]	1612.1	1740.5

ρ_A [g/cm ³]	2.595325	2.713733
-------------------------------	----------	----------

Fresato E

	pre	post
M2 [g]	3559.6	3736.6
M3 [g]	3252.1	3252.1
M4 [g]	515.5	770.1
T1 [°C]	21.4	21.1
ρ_w [g/cm ³]	0.99798	0.99807
tara teglia [g]	796.4	800.8
Mdry [g]	1311.9	1570.9

ρ_A [g/cm ³]	2.473359	2.691224
-------------------------------	----------	----------

	pre	post
M2 [g]	4349	4326.4
M3 [g]	3798.7	3800.7
M4 [g]	891.8	825.2
T1 [°C]	24.2	25.3
ρ_w [g/cm ³]	0.99734	0.99701
tara1 [g]	0	742.5
Mdry [g]	891.8	1567.7

ρ_A [g/cm ³]	2.604474	2.747021
-------------------------------	----------	----------

Fresato F

	pre	post
M2 [g]	3623.3	3752.9
M3 [g]	3250	3250
M4 [g]	622.1	793.6
T1 [°C]	24.2	24.2
ρ_w [g/cm ³]	0.99734	0.99734
tara1 [g]	0	0
Mdry [g]	622.1	793.6

ρ_A [g/cm ³]	2.493751	2.7227
-------------------------------	----------	--------

	pre	post
M2 [g]	4297.8	4260.5
M3 [g]	3801.5	3802.5
M4 [g]	806.1	727.6
T1 [°C]	21.3	21.2
ρ_w [g/cm ³]	0.99801	0.99852
tara1 [g]	742.4	787.9
Mdry [g]	1548.5	1515.5

ρ_A [g/cm ³]	2.604321	2.747581
-------------------------------	----------	----------

4.4 Percentuale di bitume e vuoti residui

0-5

Frazioni

5-20

Fresato A

Tara Cestello	3446.4
Lordo cest prima	4380.8
Lordo cest dopo	4218
Tara Capsula	534.5
Lordo Capsula dopo	656.3
Peso filler	121.8
% bitume	4.387842

ρ_{max}	2.531127
% vuoti	0.031648

Tara Cestello	3448.7
Lordo cest prima	4438.5
Lordo cest dopo	4368.3
Tara Capsula	536.4
Lordo Capsula dopo	584.1
Peso filler	47.7
% bitume	2.273187

ρ_{max}	2.59619
% vuoti	0.38722

Fresato B

Tara Cestello	3447.5
Lordo cest prima	4444.7
Lordo cest dopo	4232.1
Tara Capsula	537.8
Lordo Capsula dopo	668.5
Peso filler	130.7
% bitume	8.212996

ρ_{max}	2.416298
% vuoti	0.300913

Tara Cestello	3446.7
Lordo cest prima	4418.6
Lordo cest dopo	4335.1
Tara Capsula	552.7
Lordo Capsula dopo	601.3
Peso filler	48.6
% bitume	3.590904

ρ_{max}	2.616323
% vuoti	0.822216

Fresato C

Tara Cestello	3450.7
Lordo cest prima	4520.1
Lordo cest dopo	4332.1
Tara Capsula	535
Lordo Capsula dopo	666.5
Peso filler	131.5
% bitume	5.283336

ρ_{max}	2.46844
% vuoti	0.011986

Tara Cestello	3447.2
Lordo cest prima	4525.6
Lordo cest dopo	4438.3
Tara Capsula	534.8
Lordo Capsula dopo	593
Peso filler	58.2
% bitume	2.698442

ρ_{max}	2.60056
% vuoti	0.086739

Fresato D

Tara Cestello	3446
Lordo cest prima	4388.7
Lordo cest dopo	4209.7
Tara Capsula	534.5
Lordo Capsula dopo	649.8
Peso filler	115.3
% bitume	6.757187

ρ_{max}	2.435341
% vuoti	0.336727

Tara Cestello	3446.9
Lordo cest prima	4530
Lordo cest dopo	4453
Tara Capsula	534.6
Lordo Capsula dopo	585.7
Peso filler	51.1
% bitume	2.391284

ρ_{max}	2.610092
% vuoti	0.565751

Fresato E

Tara Cestello	3445.8
Lordo cest prima	4418.1
Lordo cest dopo	4226.8
Tara Capsula	534.3
Lordo Capsula dopo	673.7
Peso filler	139.4
% bitume	5.337859

ρ_{max}	2.474784
% vuoti	0.057568

Tara Cestello	3446.5
Lordo cest prima	4253
Lordo cest dopo	4183.8
Tara Capsula	535.2
Lordo Capsula dopo	582.4
Peso filler	47.2
% bitume	2.727836

ρ_{max}	2.579291
% vuoti	0.232088

Fresato F

Tara Cestello	3445.8
Lordo cest prima	4387.9
Lordo cest dopo	4242.6
Tara Capsula	535.9
Lordo Capsula dopo	634.2
Peso filler	98.3
% bitume	4.988855

ρ_{max}	2.513386
% vuoti	0.781242

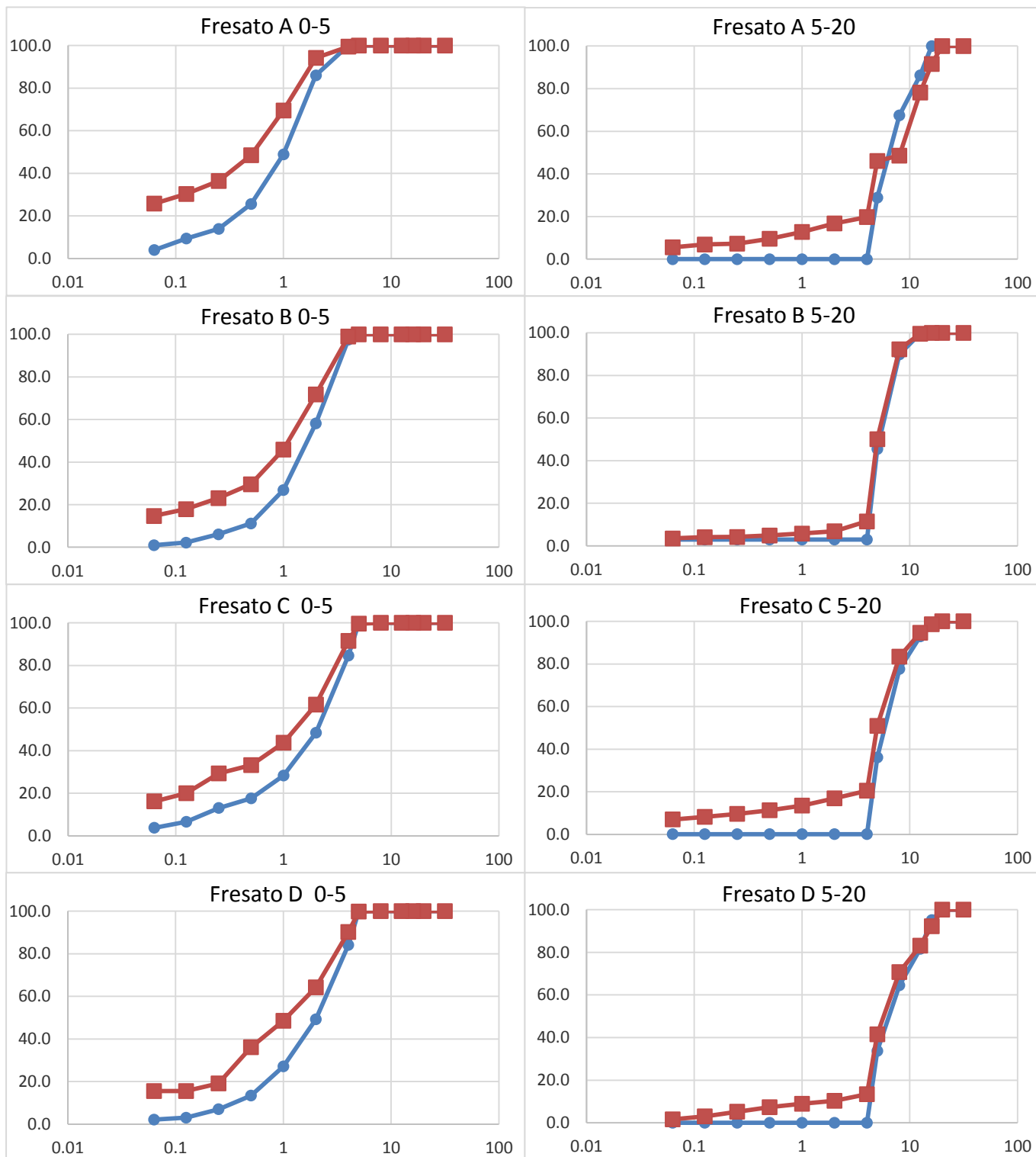
Tara Cestello	3446.4
Lordo cest prima	4336.5
Lordo cest dopo	4270.6
Tara Capsula	534.7
Lordo Capsula dopo	577
Peso filler	42.3
% bitume	2.651387

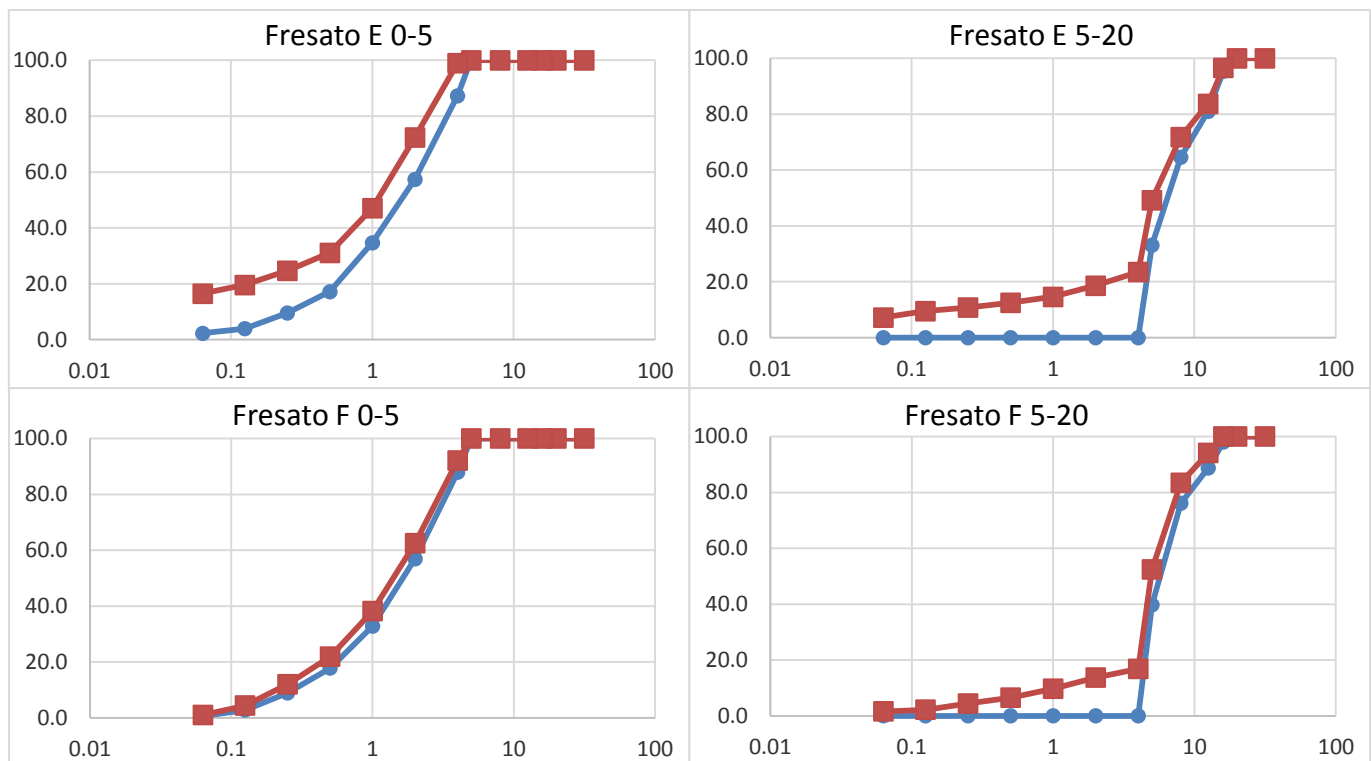
ρ_{max}	2.628999
% vuoti	0.932874

4.4 Riepilogo delle caratteristiche delle miscele

Granulometrie

In rosso le granulometrie post estrazione, in blu quelle pre.





Dal raffronto dei grafici delle sei miscele emergono i seguenti aspetti:

Per ogni miscela la curva post-estrazione, sia della frazione fina che della frazione grossa, risulta più alta della rispettiva curva pre-estrazione. In particolare lo scostamento tra le due curve cresce al diminuire dell'apertura del setaccio: questo è del tutto logico poiché gli aggregati più fini, nonché una non trascurabile quantità di filler, sono intrappolati e resi solidali dal bitume. È evidente quindi che, una volta estratto il componente legante, questo materiale tornando sciolto vada a modificare considerevolmente la disposizione granulometrica. Questo effetto risulta sempre meno apprezzabile man mano che le dimensioni dei granuli diventano maggiori poiché risulta molto più difficile tenere insieme due particelle lapidee più grandi, facilmente separabili dalla passaggio della fresatrice. In accordo con ciò l'effetto dell'estrazione di bitume quasi nullo per tutte le miscele indagate già prima del setaccio da 5 mm, con le curve pre- e post- estrazione che convergono già allo stesso valore prima o in corrispondenza di tale taglio. È infatti evidente dai grafici l'andamento della forbice tra le curve che può rimanere tutt'al più costante o essere subito ampia a piccole aperture per poi ridursi progressivamente. Per quello che riguarda le classi 5-20 in questo caso l'andamento della differenza tra le due curve è diverso rispetto a quello appena descritto: qualitativamente lo scarto parte da bassi valori e cresce fino ad un certo valore. Dopo il setaccio con apertura 4 mm praticamente le curve tornano ad essere pressoché sovrapposte, cioè non risentono più dell'influenza

dell'estrazione. Questo si spiega considerando che la miscela è priva inizialmente di tutti quei grumi, passanti al 5 mm, formati solamente da materiale fine e bitume. A suffragio di ciò si può notare come la miscela "A" fine, che è quella con maggior contenuto iniziale di fine, è anche quella in cui lo scarto iniziale è il più elevato tra i fresati indagati. Lo scostamento che si evidenzia ad aperture maggiori di 5 mm, più marcato in alcune miscele, non dipende a questo punto dalla scissione di due o più aggregati precedentemente tenuti insieme dal bitume, ma dall'effetto che esercitava sulla granulometria lo strato di bitume stesso misto a filler che comportava un ingrossamento degli inerti. Questo fenomeno è più visibile nelle miscele di fresato "C" e "E". Facendo un breve riepilogo per quanto concerne la classe 0-5 come già detto la miscela "A" è quella con la curva contenente più fine inizialmente ma soprattutto quella che maggiormente risente dell'estrazione, raggiungendo una percentuale di passante allo 0.125 mm superiore al 20%, non troppo distante comunque dall'andamento delle miscele "E" e "C". La miscela "F" delinea un comportamento totalmente opposto: si tratta infatti del fresato con percentuale iniziale di fine più piccola e, in accordo con quanto detto in precedenza, quella che meno è influenzata dall'estrazione del bitume, la curva post-estrazione infatti quasi ricalca la black curve. Le altre miscele presentano un andamento intermedio tra i due casi limite presentati. Per quanto concerne la frazione grossa delle miscele è singolare il comportamento della miscela "B" che non presenta grossi scostamenti tra le due curve, neanche per bassi valori dell'apertura; identifica quindi un fresato povero di materiale fine nei grumi più grandi mentre si evidenziava una certa variazione per la frazione fine dello stesso materiale. "E" invece marca una grande quantità di aggregato fine intrappolato in quello grosso con scostamenti che sono importanti fino al setaccio da 16 mm. "D" ha un andamento simile alla miscela "B" mentre "C" ha uno scarto importante per i valori piccoli ma torna abbastanza rapidamente a coincidere con la black curve superato il setaccio da 5 mm. In generale, analizzando i grafici, si evidenzia come le miscele con più alta percentuale di inerti trattenuti ai setacci a maglie più larghe siano quelli che producono meno differenza tra black e white curve.

Masse volumiche, percentuali di bitume e vuoti residui

Seguono alcune tabelle riepilogative recanti le grandezze principali indagate durante questo programma sperimentale, i cui calcoli espliciti sono riportati nei paragrafi precedenti di questo capitolo.

Fresato A	0-5	5-20
ρ_A [g/cm ³] pre	2.530	2.586
ρ_A [g/cm ³] post	2.709	2.690
% bitume	4.4	2.3
% vuoti	0.03	0.39

Fresato B	0-5	5-20
ρ_A [g/cm ³] pre	2.409	2.595
ρ_A [g/cm ³] post	2.754	2.778
% bitume	8.2	3.6
% vuoti	0.3	0.82

Fresato C	0-5	5-20
ρ_A [g/cm ³] pre	2.468	2.598
ρ_A [g/cm ³] post	2.673	2.713
% bitume	5.28	2.7
% vuoti	0.01	0.09

Fresato D	0-5	5-20
ρ_A [g/cm ³] pre	2.427	2.595
ρ_A [g/cm ³] post	2.708	2.714
% bitume	6.8	2.4
% vuoti	0.34	0.57

Fresato E	0-5	5-20
ρ_A [g/cm ³] pre	2.473	2.573
ρ_A [g/cm ³] post	2.691	2.695
% bitume	5.3	2.7
% vuoti	0.06	0.23

Fresato F	0-5	5-20
ρ_A [g/cm ³] pre	2.493	2.604
ρ_A [g/cm ³] post	2.723	2.747
% bitume	5.0	2.7
% vuoti	0.78	0.93

Dalle tabelle emerge come la miscela “A” sia quella con meno percentuale di bitume, difatti tale caratteristica era riscontrabile ad occhio nudo sul materiale in laboratorio, presentando un aspetto più chiaro delle altre miscele sperimentate. Al contrario la miscela “B” è quella più ricca in bitume, anche questa volta la caratteristica era apprezzabile immediatamente ad uno sguardo attento, nonché quella composta dagli aggregati mediamente più pesanti. La miscela “C” è quella con minore tenore di vuoti residui, diversamente dalle miscele “D” e “F” che presentano, insieme a “B”, le percentuali più alte tra i fresati sottoposti a sperimentazione. In particolare è interessante il comportamento di “F”, nella quale non vale il principio che, a grandi linee, a minor contenuto di bitume corrisponda minor volume di vuoti, valido invece per le altre miscele. Questa miscela è anche tra le più pesanti allo stato tal quale. Il fresato “E” invece è piuttosto leggero (frazione 5-20 “black” più leggera tra le miscele indagate).

Conclusioni

Lo scopo ultimo di questa tesi sperimentale è quello di indagare i vuoti residui nei grumi delle sei miscele di fresato sperimentate. Dai risultati riportati nel capitolo precedente emergono alcuni aspetti principali:

- Le miscele post-estrazione hanno masse volumiche maggiori rispetto a quelle sul materiale tal quale. Questo deriva dal fatto che la massa volumica del bitume è inferiore a quella dell'aggregato bianco;
- La frazione fina di un fresato pesa generalmente di più rispetto alla frazione grossa dello stesso. Le percentuali di bitume sono più elevate nelle frazioni fini, poiché, avendo una superficie specifica maggiore, richiedono in proporzione più legante per essere ricoperte.
- I valori dei vuoti residui sono sempre piuttosto esigui, mai superiori dell'1%;
- Si evidenziano valori maggiori dei vuoti nelle frazioni 5-20: ciò si traduce nell'aver più spazi non saturati, né da acqua né da bitume, all'interno dei grumi più grandi di fresato;
- A stesse percentuali di bitume non necessariamente corrispondono percentuali di vuoti residui simili tra di loro.

Bibliografia

- UNI EN 1097-6:2008 Miscele bituminose - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati. Parte 6: determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua;
- UNI EN 933-1:2012 Miscele bituminose – prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per setacciatura.
- UNI EN 933-8:2000 Miscele bituminose – prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati. Valutazione dei fini. Prova dell'equivalente in sabbia;
- UNI EN 12697-5:2010 Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 5: Determinazione della massima densità;
- UNI EN 12697-6:2008 Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo. Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi;
- Capitolato speciale d'appalto, Anas Spa;
- F.A. Santagata – Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.1: Progettazione (2016);
- F.A. Santagata – Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.2: Costruzione, gestione e manutenzione (2016).
- Collepardi M, Scienza e tecnologia del calcestruzzo. Terza edizione aggiornata, Hoepli, Milano, 1991.