

Università Politecnica delle Marche



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

Ottimizzazione di miscele con emulsione bituminosa e filler attivo per pavimentazioni stradali

Mixtures optimization with bitumen emulsion and active filler for road pavements

TESI DI LAUREA DI

Emiljano Bajrami

RELATORE

Prof. Ing. Maurizio Bocci

CO-RELATORE

Carlo Carpani

Anno Accademico 2021-2022

Sommario

INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1: Stato dell'arte	5
1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI.....	5
1.2 CONGLOMERATO BITUMINOSI	8
1.3 BITUME.....	9
1.4 EMULSIONE BITUMINOSA	17
1.5 IMPIANTI.....	20
1.6 MIX DESIGN	30
CAPITOLO 2: Programma sperimentale	32
2.1 MATERIALI	34
2.2 MISCELAZIONE E COMPATTAZIONE DEI PROVINI.....	42
2.3 DETERMINAZIONE DELLA COMPATTABILITA' DEI PROVINI.....	55
2.4 PROVA DI MODULO A TRAZIONE INDIRETTA (ITSM).....	55
2.5 PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA (ITS).....	63
2.6 PROVA LEUTNER	68
CAPITOLO 3: Analisi dei risultati	74
3.1 MASSE ED ALTEZZE DEI PROVINI	74
3.2 ANALISI E CONFRONTO SULLA COMPATTABILITA'	78
3.3 ANALISI DELLA PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA E MODULI DI RIGIDEZZA (ITS E ITSM).....	84
3.4 CONFRONTO RISULTATI ITSM E ITS.....	87
3.5 ANALISI E CONFRONTO PROVA LEUTNER	97
CONCLUSIONI	98
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	100

INTRODUZIONE

Lo studio di una pavimentazione occupa un ruolo predominante nel progetto di un'opera infrastrutturale, poiché non riguarda solo la fase preliminare del processo di progettazione, ma interessa l'intero ciclo di vita dell'opera. Essa deve garantire differenti caratteristiche prestazionali e tecnologiche, sin dal primo momento dalla sua messa in esercizio. La funzione strutturale delle pavimentazioni stradali sarà quella di garantire regolarità e aderenza al piano viabile dove transiteranno i mezzi di trasporto e resistenza ai carichi dinamici senza la formazione e l'evoluzione di dissesti e degradi. Considerando gli alti costi iniziali ed annuali per la manutenzione, l'obiettivo principale che deve porsi l'ingegnere stradale è quello di progettare e dare garanzie dal punto di vista prestazionale durevoli nel tempo, seppur in generale, le strade sono sovente progettate per durare circa 20 anni (vita di progetto), a differenza di tutte le altre opere di ingegneria civile. Le pavimentazioni stradali si classificano in due principali tipologie, le pavimentazioni rigide e le flessibili, quest'ultime comprendono una sottocategoria denominata "semirigide". La scelta di impiegare un tipo di pavimentazione rispetto ad un'altra dipende da diversi aspetti sia dal punto di vista strutturale, per la capacità di resistere sotto determinati carichi, che da fattori climatici e ambientali caratteristici del luogo in cui sorgerà la nuova strada, anche se ci sono diversi paesi che per praticità costruttiva e di manutenzione, prediligono l'utilizzo di un tipo di pavimentazione rispetto ad un'altra, indipendentemente dal tipo di uso. Generalmente si utilizzano le pavimentazioni rigide e semirigide, per piazzali o parcheggi soggetti allo stazionamento di carichi pesanti o nei casi in cui si presentano inadeguate caratteristiche del piano di posa, mentre le pavimentazioni flessibili si utilizzano in tutti gli altri ambiti, usualmente per il transito dei veicoli ordinari e dove non sono richieste alte prestazioni tecniche come negli altri casi.

Nella fattispecie la seguente tesi tratterà lo studio di un particolare conglomerato bituminoso realizzato a freddo, con emulsione bituminosa ed elevato dosaggio di filler attivo. Utilizzare l'azione combinata di emulsione e filler attivo ha lo scopo di consentire la contemporanea diminuzione dello spessore dello strato necessario (filler attivo) mantenendo in parte le proprietà visco-elastiche del bitume (emulsione bituminosa). In particolare, la tesi è articolata nei seguenti capitoli:

- Capitolo 1 – STATO DELL'ARTE

Viene descritto il conglomerato bituminoso con aggiunta di cemento o filler reattivo, partendo dal conglomerato bituminoso standard.

- **Capitolo 2 – INDAGINE SPERIMENTALE**

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

- **Capitolo 3 – ANALISI DEI RISULTATI**

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

- **CONCLUSIONI**

CAPITOLO 1: Stato dell'arte

1.1 PAVIMENTAZIONI STRADALI

La sovrastruttura stradale è formata da un insieme di strati di vario spessore, costituiti da materiali differenti dal punto di vista fisico e meccanico. La scelta dei materiali che compone ogni strato deriva principalmente da considerazioni di tipo tecniche ed economiche: ogni strato è costituito dal materiale più idoneo a rispondere alle sollecitazioni indotte dal traffico, la cui entità decresce dall'alto verso il basso. A causa dei forti carichi a cui è soggetta una pavimentazione e soprattutto data la natura dei materiali da cui è composta, la composizione dei vari strati seguirà un determinato ordine. Gli strati superficiali assolvono la funzione di assorbire la gran parte delle sollecitazioni provenienti direttamente dai veicoli e perciò è richiesto che i materiali utilizzati siano in grado di resistere alle sollecitazioni tangenziali e normali, mentre gli strati più profondi, generalmente formati da materiali non legati, non potendo resistere alle sollecitazioni di taglio, devono esclusivamente essere soggetti a sollecitazioni normali. La riduzione delle tensioni, procedendo dall'alto verso il basso, dipende dalla rigidità e dallo spessore di ogni singolo strato.

In generale le pavimentazioni assolvono i seguenti compiti:

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

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

- **Fondazione:** si realizza sopra al sottofondo e la sua funzione è quella di trasmettere i carichi a quest'ultimo (misto granulare)

- Base: costituisce la struttura della pavimentazione e ripartisce i carichi di traffico (conglomerato bituminoso o misto cementato)
- Binder: collegamento tra base e tappeto d'usura che garantisce la regolarità (conglomerato bituminoso)
- Tappeto d'usura: deve fornire regolarità e aderenza considerando che è il più esposto a deformazioni e usura (conglomerato bituminoso)

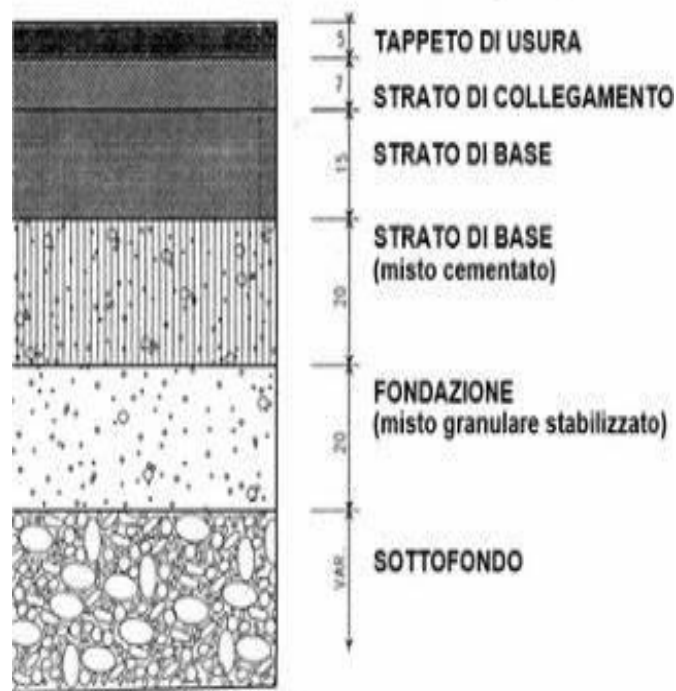


Figura 1: esempio di pavimentazione

Ci possono essere altri strati, chiamati strati accessori:

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

In base alle miscele utilizzate e agli strati realizzati, si identificano una vasta gamma di sovrastrutture stradali e la scelta tipo logica costituisce oggetto stesso della progettazione.

Esistono tre macrogruppi di pavimentazioni in funzione della loro realizzazione:

1. Flessibili: Costituite da una serie di strati legati poggiati su uno strato di fondazione in materiale granulare;
2. Semirigide: Costituite da una successione di strati simile alle precedenti, con la sola differenza che in corrispondenza degli strati di base o di fondazione è presente un materiale legato generalmente con cemento (misto cementato) o da altri materiali come le emulsioni bituminose o i bitumi schiumati, formando una struttura più resistente;
3. Rigide: più resistenti e più sottili delle precedenti, formate in superficie da lastre in calcestruzzo (in alcuni casi ricoperte da uno strato di usura in conglomerato bituminoso) posata su uno o più strati di fondazione in misto cementato e/o misto granulare o direttamente poggiate sul terreno di sottofondo se quest'ultima ha adeguata capacità portante.

Le pavimentazioni flessibili e le semirigide, hanno caratteristiche tecniche e strutturali molto simili tra loro, differenziate solamente dallo strato di fondazione. Nelle pavimentazioni flessibili troviamo uno strato formato da elementi granulari non legati, o in alcuni casi con elementi stabilizzati o con altri elementi granulari opportunamente scelti in base ad un determinato fuso granulometrico o con l'aggiunta in percentuali molto basse di leganti quali calce o cemento. Le pavimentazioni semirigide, invece, sono caratterizzate nell'aver uno strato di base o fondazione stabilizzata con alte percentuali di legante che va dunque ad elevare la qualità in termini di risposta meccanica rispetto alle flessibili.

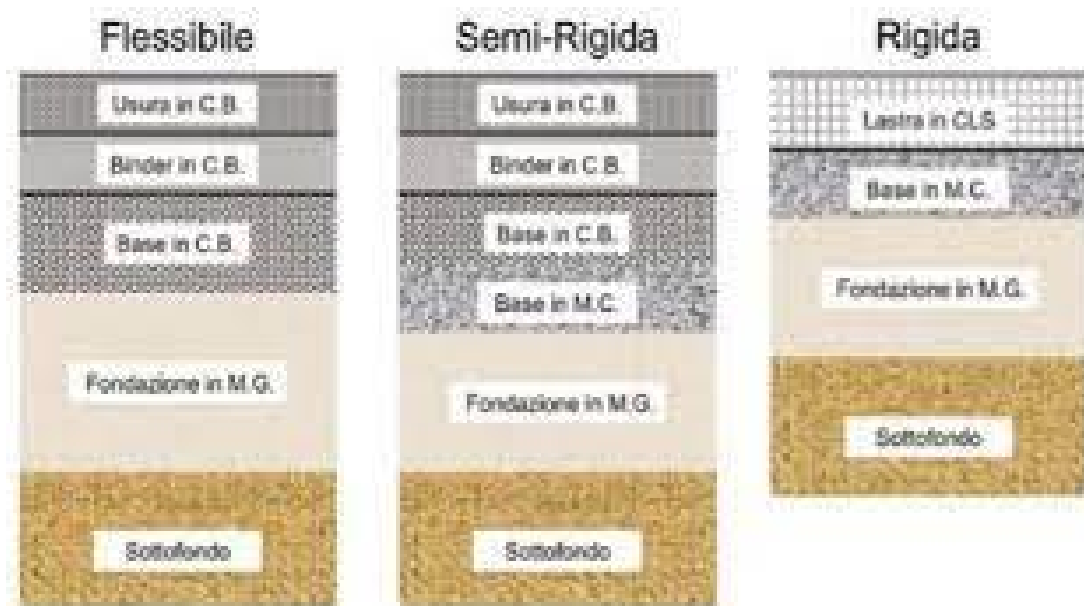


Figura 2: differenza tra pavimentazione flessibile, semirigida e rigida

1.2 CONGLOMERATO BITUMINOSI

I conglomerati bituminosi sono materiali compositi ottenuti dalla miscelazione di aggregati lapidei, legante bituminoso, filler, ed eventuali additivi. Il campo di impiego più diffuso dei conglomerati bituminosi è di gran lunga quello delle pavimentazioni flessibili o semirigide, sebbene siano da annoverare anche altre applicazioni quali, per esempio: i manti di ricoprimento di lastre rigide in calcestruzzo (pavimentazioni composite) o i sub-ballast ferroviari. Limitando l'attenzione al primo caso, i conglomerati presentano caratteristiche differenti in relazione allo strato della pavimentazione cui sono destinati: caratteristiche volumetriche, proprietà meccaniche e composizione. Gli aspetti principali legati alla composizione riguardano l'assortimento granulometrico degli aggregati e il dosaggio del legante. La miscela lapidea deve rispettare opportuni limiti dimensionali in modo da rientrare all'interno di un fuso granulometrico definito sulla base di una curva di distribuzione ottimale e di predefinite tolleranze. Nei materiali di tipo tradizionale, si fa riferimento alla formulazione di Fuller dove si adotta un diametro massimo più elevato per gli strati di base e valori via via decrescenti per quelli superiori, caratterizzati da un assortimento più fine. Nel sistema SUPERPAVE, i limiti granulometrici sono indicati mediante dei punti di controllo, ricavati sperimentalmente rispetto alla retta di massima densità e stabiliti in funzione del diametro nominale massimo.

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

In generale, un incremento della percentuale di filler determina una riduzione del contenuto ottimale di bitume, un aumento della densità finale della miscela, della sua stabilità e rigidità. Di contro, se dosato in quantità eccessiva compromette le caratteristiche di lavorabilità e comporta un incremento considerevole della superficie specifica degli aggregati, con conseguente riduzione dello spessore della pellicola legante che può esporre il materiale a un processo di ossidazione più repentino e a problemi di perdita di adesione. La distribuzione dei granuli influenza anche il contenuto di bitume, espresso generalmente in valore percentuale rispetto al peso degli aggregati. La quantità ottimale deve essere tale da ricoprire, con una pellicola legante di spessore adeguato, la superficie complessiva di tutte le particelle; ciascuna tipologia di spessore aggregato è caratterizzato da una propria superficie specifica la quale, in linea di massima, cresce al decrescere della sua dimensione media. La determinazione del dosaggio di effettivo impiego avviene attraverso la procedura di mix design.

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

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

1.3 BITUME

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

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

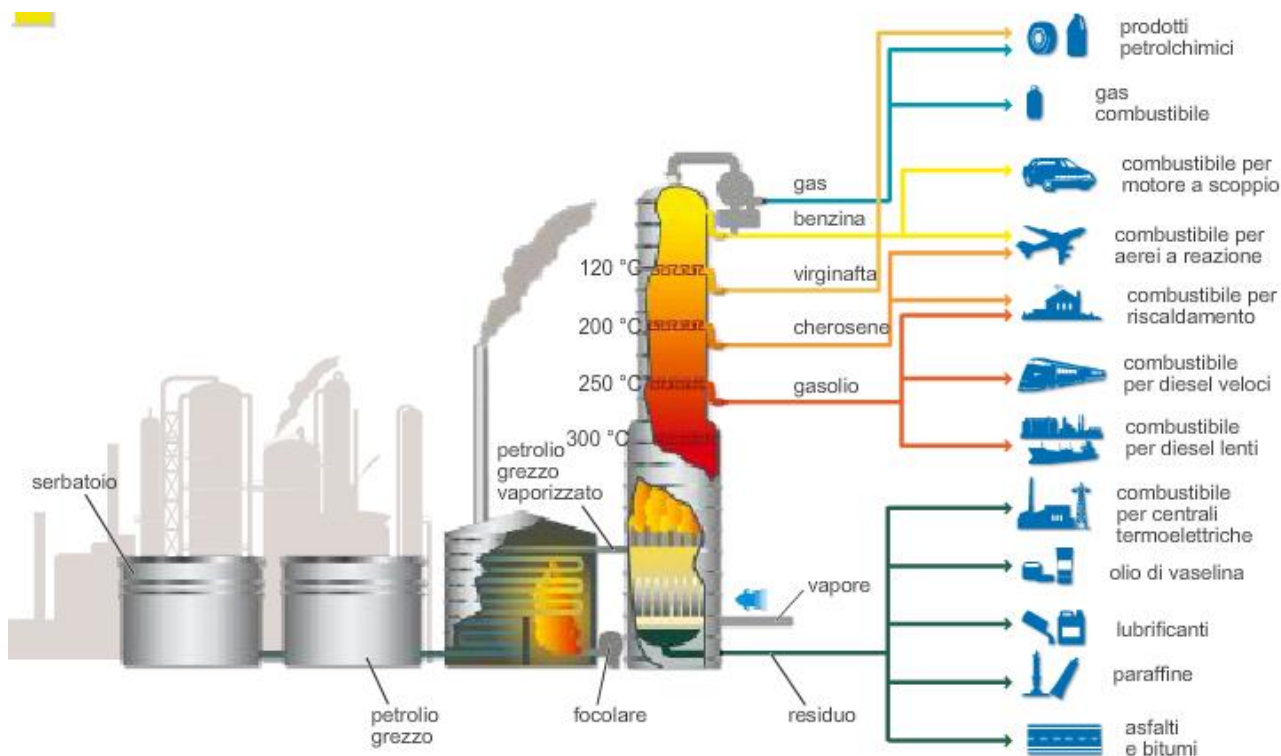


Figura 3: Processo di raffinazione

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

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

Le proprietà del bitume variano a seconda della temperatura cui risulta sottoposto; ciò permette di ottenere un materiale semiliquido alle temperature di miscelazione e compattazione e semisolido alla temperatura di esercizio. A temperatura ambiente, ha un colore scuro che va dal nero al bruno scuro ed ha come caratteristiche principali quelle di essere termoplastico e molto aderente. Questo materiale si presenta come un complesso

di miscele varie che sono per la maggior parte idrocarburi e in più vi è la presenza di composti organici come l'ossigeno, l'azoto e lo zolfo la cui percentuale varia dall'1 al 10%. La restante parte viene occupata per l'80% dal carbonio e il 10% dall'idrogeno. Con l'ossidazione il bitume può perdere gran parte delle sue proprietà, andando incontro all'invecchiamento e perdendo al contempo la propria elasticità.

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

Ciascuna componente svolge una specifica funzione: gli asfalteni sono strutture complesse che determinano il comportamento del bitume al variare della temperatura (viscoso, elastico, plastico) e la resistenza alle sollecitazioni meccaniche. I saturi e aromatici sono sostanze chimiche che costituiscono il componente più fluido del bitume ed influiscono sul suo comportamento ad elevate temperature conferendogli la capacità di ricoprire estese superfici di altro materiale. Essi sono impermeabili all'acqua e proprio per questo motivo vengono largamente utilizzati per creare dei rivestimenti, avendo anche allo stesso tempo, un alto potere adesivo e di coesione. Le resine sono composti solubili viscosi a temperatura ambiente e con notevoli proprietà adesive, svolgendo un'azione disperdente degli asfalteni, conferendo flessibilità e duttilità al bitume quando sottoposto a sollecitazioni. È quasi impossibile che possano esistere due tipi di bitume con la stessa identica composizione chimica, in quanto essa dipende dal tipo di origine e dagli eventuali processi di raffinazione a cui il greggio è stato sottoposto. Esiste poi, una scienza, che studia gli equilibri raggiunti nella materia deformata per effetto di sollecitazioni, chiamata reologia. Essa è una prova razionale, che studia il comportamento tenso-deformativo di un materiale in funzione della temperatura. Il comportamento reologico del bitume dipende dallo stato di aggregazione delle miscele e dunque dal rapporto tra asfalteni, malteni e resine e si modifica al variare della temperatura:

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

Esiste una temperatura (T_g) detta temperatura di transizione vetrosa tale che per $T < T_g$ il comportamento reologico possa essere associato a quello di un solido.

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

Questa peculiarità risulta particolarmente rilevante nell'ottica del recupero del materiale fresato derivante dalla demolizione di vecchie pavimentazioni per il confezionamento di nuovo conglomerato tramite tecnica di riciclaggio a caldo. Esponendo il materiale fresato ad alta temperatura durante la miscelazione con gli aggregati vergini e il bitume di aggiunta, parte del legante che lo ricopre tende a "riattivarsi" e si miscela con il bitume vergine. Il bitume riattivato proveniente da fresato è però un bitume che ha subito tutti i processi di invecchiamento e presenta pertanto caratteristiche alterate rispetto a quelle possedute inizialmente. Successivamente, la miscela finale riciclata di bitume vergine e bitume invecchiato avrà caratteristiche intermedie e tenderà ad essere più rigida e fragile di un'equivalente miscela composta unicamente da materiale vergine. Per bilanciare l'irrigidimento apportato dal bitume riattivato del fresato, oltre all'impiego di specifici additivi "rigeneranti" che mirano a ripristinare le caratteristiche del bitume "invecchiato", occorre tarare opportunamente la scelta del bitume vergine di aggiunta: esso dovrà essere più "soffice" per compensare almeno parzialmente l'effetto irrigidente del bitume riattivato. La scelta è anche funzione della quantità di materiale fresato che si intende inglobare nella miscela.

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

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

Per prima cosa si prende un campione di bitume e si cola in un bicchierino e si mette in stufa a 25°C per un'ora in modo da avere una temperatura del campione omogenea. Dopodiché si infligge un ago sulla superficie di bitume e tramite una lente si vede il

contatto. Si lascia cadere l'ago con un carico di 100 gr per un tempo di 5 secondi e ripeto per tre volte. Il risultato poi è la media di questi tre risultati. Quanto più il bitume è molle tanta più la penetrazione sarà elevata; attraverso questa prova si può operare una classificazione tecnico commerciale dei bitumi in base al loro grado di durezza come intervallo di valori. Per esempio, un bitume classificato 50/70 ha una penetrazione compresa tra 50 e 70 decimillimetri;



Figura 4: Prova di penetrazione

2. Prova fraass: il bitume al diminuire della temperatura diventa fragile. Lo scopo della prova è misurare la fragilità di un bitume a bassa temperatura, tramite la determinazione del punto di rottura per flessione ciclica con metodo standardizzato.

Il punto di rottura Fraass, cioè la temperatura alla quale si presenta la rottura, evidenzia la resistenza meccanica del bitume alle basse temperature. L'intervallo di temperatura compreso tra il punto di rottura Fraas e il punto di rammollimento viene definito come "intervallo di elastoplasticità" nel quale il bitume varia il suo comportamento.

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



Figura 5: Prova fraass

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

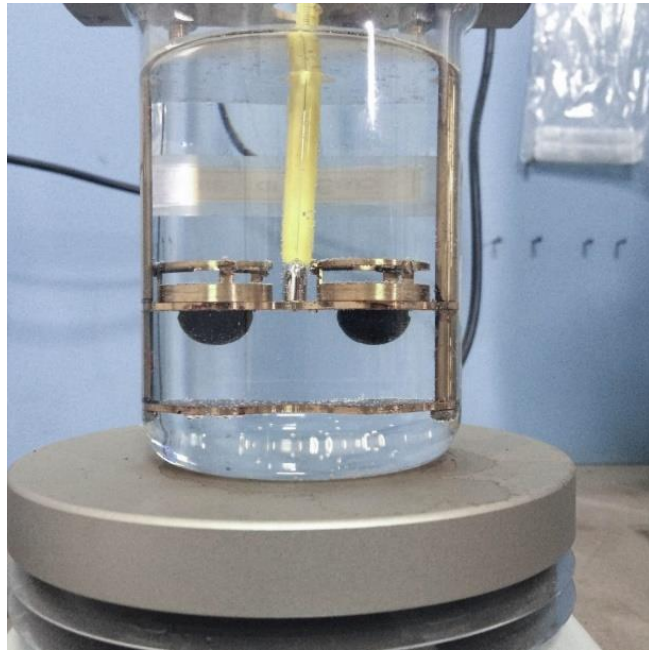


Figura 6: Prova palla anello

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



Figura 7: Prova di duttilità

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



Figura 8: Prova di viscosità

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



Figura 9: Rolling thin film oven

1.4 EMULSIONE BITUMINOSA

Un' emulsione è una dispersione di un liquido in un altro non miscibile, ottenuta in presenza di un prodotto emulsionante. Viene definita *emulsione acida* quella in cui l'elettroforesi conduce le particelle verso il catodo; *l'emulsione basica*, al contrario, presenta uno spostamento opposto delle particelle. Le emulsioni stradali sono costituite in modo che la fase dispersa è data dal legante idrocarburato, mentre l'acqua rappresenta la fase disperdente. L'impiego di emulsione bituminosa permette di ottenere il bitume a temperatura ambiente, comportando i seguenti vantaggi:

- Riduzione delle emissioni in ambiente
- Salvaguardia della salute degli operai
- Minore impatto ambientale
- Riduzione dei costi

Il bitume si presenta sotto forma di goccioline disperse nell'acqua; quando l'acqua evapora rilascia il bitume. Generalmente la percentuale di bitume impiegata in un'emulsione bituminosa è compresa tra il 50 – 70%. Le emulsioni bituminose possono essere classificate

in base al tenore di bitume, alla viscosità e alla velocità di rottura, dove per rottura di un'emulsione si intende la separazione fra il bitume e il liquido emulsionante. La velocità di rottura è un aspetto fondamentale e si sviluppa in tre fasi:

- *Decantazione*: separazione di acqua e bitume. Preso un fusto di emulsione prodotta, le gocce di bitume tendono a scendere per gravità e si addensano sul fondo;
- *Flocculazione*: le gocce di bitume tendono a sovrapporsi;
- *Coagulazione*: fusione delle gocce di bitume e formazione di coaguli;
- *Rottura*: l'acqua rimasta in superficie tende ad evaporare e rilascia solo il bitume.

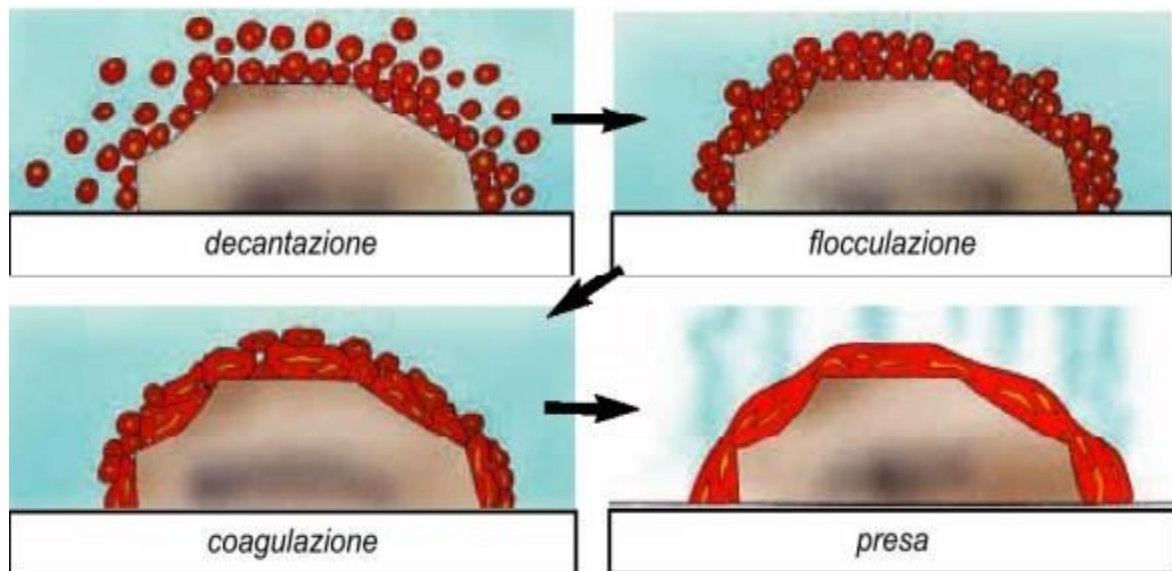


Fig. 10: Fasi di rottura di un'emulsione

I processi di rottura e di presa sono influenzati da molteplici fattori, tra essi assumono particolare importanza:

- la tipologia di aggregato, in termine di assortimento granulometrico, contenuto di vuoti e velocità di assorbimento dell'acqua;
- umidità della miscela prima e dopo il costipamento;
- temperatura degli aggregati e dell'aria;
- forze meccaniche derivanti dal pompaggio, dal costipamento e dal traffico;
- contenuto totale del liquido: definisce il rapporto umidità/densità dell'emulsione, è di notevole rilevanza perché il bitume e l'acqua agisce da lubrificanti, favorendo il

costipamento;

- modalità esecutive e tipologie di applicazione.

Un altro aspetto importante è l'affinità dell'agente emulsionante con il bitume. Infatti, se l'agente emulsionante è di origine cationica, rilascia sulla superficie del bitume cariche positive, mentre se l'agente emulsionante è di origine anionica, rilascia sulle particelle di bitume cariche negative. Generalmente le emulsioni che vengono utilizzate nel settore stradale sono emulsioni cationiche.

Le emulsioni bituminose vengono denominate in relazione:

- al tipo di emulsionante (cationico o anionico), alla percentuale di bitume impiegata, al tipo di bitume (semplice o modificato) e alla velocità di rottura. Il primo termine: la lettera indica se l'emulsione è cationica (C) o anionica (A);
- il secondo termine: il numero indica la percentuale di bitume impiegato;
- il terzo termine: la lettera indica l'impiego di bitume semplice (B);
- il quarto termine: la lettera indica se il bitume è modificato con polimeri (P);
- il quinto termine: la lettera indica l'aggiunta di un flussante con una percentuale maggiore del 3% (F);
- l'ultimo termine: il numero indica la velocità di rottura e conseguentemente il tempo di rottura.

1.5 IMPIANTI

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



Figura 11: Schema di un impianto fisso

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

Gli impianti mobili, per ciò che attiene ai principi di funzionamento, non differiscono in modo sostanziale da quelli fissi. Vengono allestiti in prossimità o all'interno dell'area di cantiere, riducendo così in modo significativo le distanze e i tempi di trasporto con conseguenti vantaggi sia di natura tecnica, sia di natura economica. Essendo per loro natura temporanei e a servizio esclusivo di un determinato cantiere, si ricorre a essi nel caso di lavori di notevole importo.



Figura 12: Impianto mobile

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

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



Figura 13: Tramogge per la separazione degli aggregati

differenti composizioni anche nell'arco della stessa giornata, poiché risultano più versatili e garantiscono maggior controllo della produzione. L'impianto discontinuo produce singoli impasti miscelati per 40-50 secondi. Questo tipo è il più diffuso e il più facile da controllare, permettendo inoltre la massima flessibilità di utilizzo, grande versatilità e controllo sulle emissioni dei fumi per merito della presenza del filtro. Sono contraddistinti dalla presenza, a valle del tamburo di riscaldamento ed essiccazione, di una torre di miscelazione dove il conglomerato bituminoso viene prodotto in modo ciclico, anziché continuativo, in quantità predefinita per ogni ciclo. Gli aggregati vengono prelevati dai cumuli posti a margine del cantiere e caricati grazie all'impiego di una pala meccanica; dopodiché il processo produttivo, può concettualmente distinguersi in due fasi.

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

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



Figura 14,15: Tamburo essiccatore parte esterna, Tamburo essiccatore parte interna

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

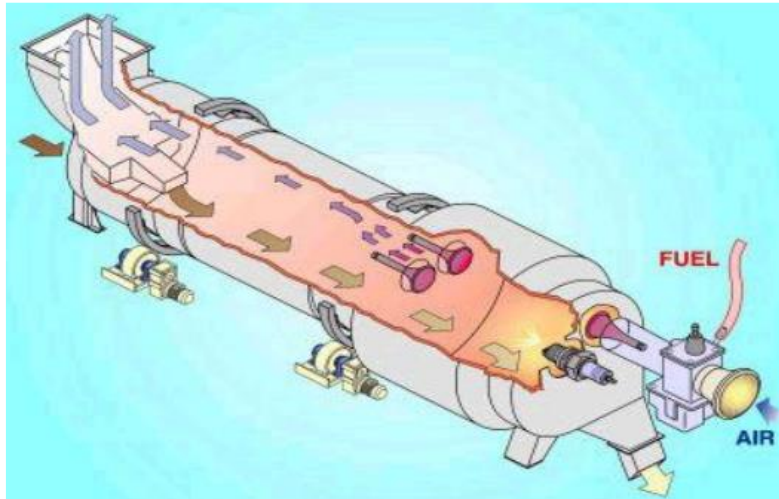


Figura 16: Fiamma controcorrente agli aggregati all'interno del tamburo essiccatore

Dentro questo cilindro, c'è un bruciatore che alimenta aria calda e il calore viene passato per irraggiamento termico agli inerti perdendo progressivamente umidità; in uscita, a una temperatura di circa 160-170 °C, è perfettamente asciutto. Durante l'essiccazione, l'aria all'interno del tamburo densa di vapori d'acqua, di polveri prodotte dal rotolamento dei pietrischi e dei gas della combustione, viene aspirata da una ventola e filtrata attraverso un apposito depuratore (filtro a maniche) prima dell'espulsione attraverso il camino. Negli impianti discontinui, la fiamma opera in controcorrente agli aggregati (linea marrone in figura) che si avvicinano ad essa e consente un progressivo riscaldamento degli aggregati e allo stesso tempo un'ottimizzazione della quantità di energia necessaria per riscaldare gli aggregati. Norme severissime regolamentano le emissioni. Nella posizione della fiamma, c'è anche un ventilatore che spinge l'aria calda verso la parte opposta del cilindro, facendo raccogliere le polveri delle particelle di acqua e i residui della combustione (freccie grigie in figura) nel filtro per essere abbattuti. Tutto ciò viene realizzato in modo da non inquinare l'aria facendo uscire solo vapore acqueo. Gli inquinanti considerati sono quelli tipicamente monitorati per le attività industriali, ovvero polveri sottili che si distinguono in: particelle inferiori a 10 μm , e particelle con diametro inferiore a 2,5 μm . Tale distinzione, riflette la differente capacità del particolato, di raggiungere le diverse parti dell'apparato respiratorio in funzione delle sue dimensioni: le particelle di diametro compreso tra 10 μm e 2,5 μm sono in grado di penetrare nell'apparato respiratorio dalle cavità nasali fino ai bronchioli, mentre quelle di diametro inferiore a 2,5 μm possono penetrare più profondamente nei polmoni fino agli alveoli. Data questa problematica, i controlli sono serrati e i limiti sempre più restrittivi; ciò comporta un ammodernamento di essi in modo

da far uscire solo vapore acqueo. Quello che fuoriesce dagli impianti (gas di scarico), viene convogliato verso un sistema di filtri per le polveri, le quali vengono raccolte tramite una coclea e stoccate in un apposito silo, per poi essere impiegate come filler al momento della miscelazione. Una volta che il filtro si intasa, viene sottoposto a dei colpi, dato da impulsi, in modo da far cadere il trattenuto fino. Nella seconda fase, gli aggregati provenienti dal cilindro vengono trasportati per mezzo di un elevatore a tazze nella parte alta della torre di miscelazione ove trovano alloggio l'unità di selezione dotata di vagli vibranti, i contenitori di stoccaggio, il sistema di pesatura e il mescolatore.



Figura 17: Torre di miscelazione

Nella parte alta sono presenti i vagli vibranti, disposti in ordine di dimensione decrescente, provvedendo alla cosiddetta riclassificazione degli aggregati, separando le frazioni progressivamente trattenute per convogliarle nei rispettivi contenitori, consentendo di eliminare il materiale troppo grande. Alla parte più fine passante all'ultimo vaglio, utilizzata in quantità elevata nella maggior parte delle miscele, è generalmente dedicato un contenitore più grande. È opportuno che l'area dei vagli sia adeguata al quantitativo di materiale che arriva dall'essiccatore e alla capacità del mescolatore, infatti, in caso di intasamento di un determinato vaglio, dovuto a eccesso di materiale, gli aggregati fini tendono a "galleggiare" al di sopra di quelli di maggiore dimensione, ricadendo nel contenitore corrispondente alla classe più grossa anziché attraversare le maglie del vaglio stesso. Tale circostanza porta, di norma, a una miscela finale più ricca di frazione fina,

caratterizzata da un minore grado di ricoprimento delle particelle da parte del legante, che determina consistenti errori di produzione rispetto ai requisiti richiesti. Negli impianti grandi, i contenitori a caldo (sili a caldo), possono contenere varie tipologie di aggregati che si utilizzano per realizzare la base, il binder o il tappeto in modo da poter fare delle variazioni tra un impasto e un altro. Gli aggregati vengono estratti per peso, inerti essiccati in modo da non dare importanza all'acqua che può spostare il proporzionamento ed evitare quindi uno scorretto dosaggio. Il tutto finisce nella camera di miscelazione, chiusa, dove oltre alla presenza degli aggregati, viene pompato il bitume, eventuali additivi e infine il filler poiché tende a assorbire la maggior parte della quantità di bitume; se fosse immesso prima, potrebbe raccogliere il bitume e non favorire la dispersione sulla superficie degli aggregati. La camera è costituita da bracci, che sono a loro volta muniti di palette in corrispondenza delle estremità. Infine, una volta inserito tutto, parte la miscelazione ad una temperatura di circa 150-160°C, calibrando il tempo in modo da ottenere un rivestimento uniforme di tutti gli aggregati da parte del legante, senza provocarne un eccessivo invecchiamento.

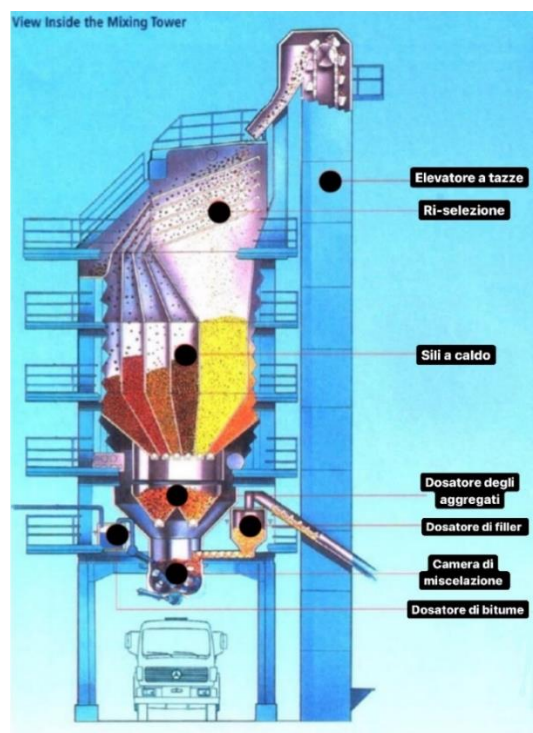


Figura 18: Diverse fasi nella torre di miscelazione

Al termine della miscelazione prende vita il “conglomerato”, si apre la parte di sotto della camera e si scarica il prodotto sul mezzo di trasporto, in modo da iniziare un nuovo

processo di miscelazione per un altro dosaggio. Il ciclo di miscelazione dura circa 30 secondi ma possono essere modificati sulla base della presenza di additivi e di tipi di impasti dalla cabina di comando. Dopo di che, il conglomerato è pronto per la consegna e viene stoccato in un silo in attesa del trasporto verso il cantiere di stesa.

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



Figura 19: Stoccaggio bitume tramite autobotti

Gli impianti di tipo continuo sono così chiamati perché la produzione ha un flusso continuo. Si possono distinguere in due tipologie: quelli comunemente noti come drum mixer (tradizionale), caratterizzati da un processo produttivo che si svolge in un'unica unità operativa e quelli caratterizzati dalla presenza di un sistema di miscelazione esterno, posto a valle del cilindro essiccatore che serve a riscaldare i materiali. Il metodo tradizionale prevede un unico cilindro con la doppia funzione di riscaldamento e miscelazione. La miscelazione del materiale avviene all'interno del tamburo essiccatore che, proprio per assolvere a questa funzione, è assai più lungo, fungendo contemporaneamente da essiccatore e da mescolatore. La netta separazione tra processo di miscelazione e di

essiccazione, si traduce in notevoli vantaggi in termini di qualità di miscelazione ed emissioni dei gas di scarico.

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

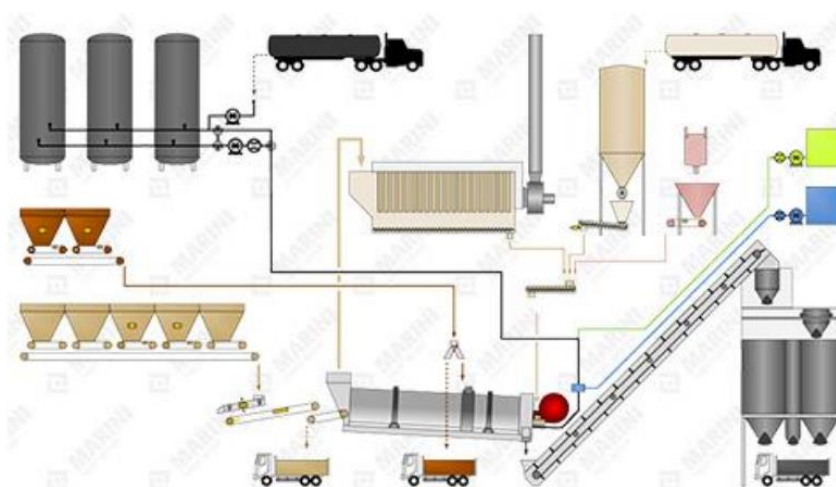


Figura 20: Schema impianto continuo

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

Il cilindro essiccatore-miscelatore lavora in modalità a flussi “concorrenti”, secondo cui gli aggregati, immessi nel tamburo dal lato del bruciatore, vengono progressivamente essiccati e riscaldati mentre scorrono verso il lato opposto di fuoriuscita, allontanandosi dunque dalla fiamma in modo “concorde” con i gas di scarico, al fine di mantenere il punto

di ingresso del legante a una sufficiente distanza dalla fiamma (per evitarne la combustione o l'eccessiva ossidazione).

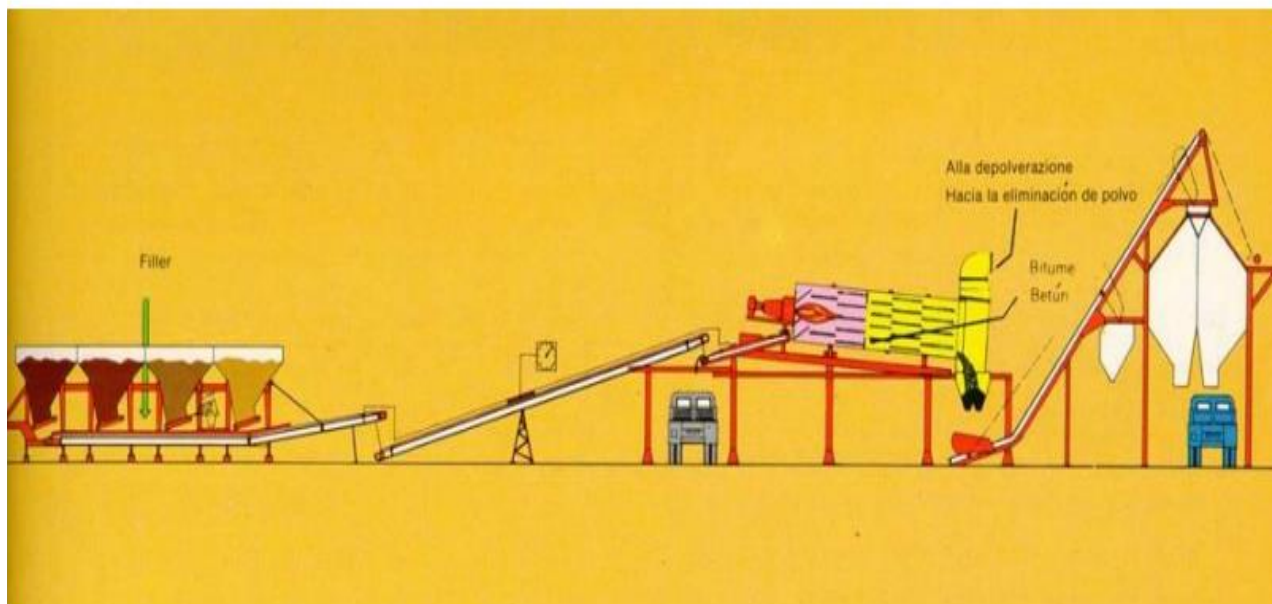


Figura 21: Processo impianto continuo

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

Negli ultimi anni però, date le problematiche, si è lasciato invece più spazio a impianti dove, nel cilindro, si lascia solo l'operabilità di riscaldamento, mettendo un mescolatore esterno che consenta una modalità di riscaldamento differente con un risparmio energetico. In questo tipo di impianto l'unità di miscelazione è dotata di palette

opportunamente sagomate, che provvedono a mescolare gli aggregati caldi col bitume, eventuali additivi e infine filler, in modo da realizzare un flusso ininterrotto. Questo sistema consente di invertire i flussi all'interno al cilindro essiccatore poiché non è presente il bitume. Tradotto, la ventola e il bruciatore sono disposti nella parte opposta rispetto all'ingresso degli aggregati, avendo un riscaldamento omogeneo.

I possibili problemi nella produzione dei conglomerati bituminosi sono:

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

1.6 MIX DESIGN

Con il termine mix design, si intende l'insieme di attività di studio e di laboratorio che consente di definire la composizione ottimale di una miscela (assortimento granulometrico, dosaggio del bitume ed eventuali additivi), nel rispetto delle prescrizioni di capitolato e delle prestazioni richieste nel progetto esecutivo. La granulometria viene scelta in funzione dello strato in cui la miscela viene utilizzata e dell'indice dei vuoti da ottenere, adeguando i componenti fintanto che non si raggiungono le caratteristiche desiderate. È altrettanto noto, che il proporzionamento degli aggregati disponibili, con le

correzioni necessarie per l'ottenimento del volume desiderato di vuoti nella miscela, rappresenta uno dei passaggi più importanti e complicati del processo di progettazione delle miscele. Difatti la proporzione dei costituenti è il risultato finale di una serie di attività complesse che implicano la conoscenza approfondita delle tecnologie produttive e costruttive, delle proprietà dei materiali e delle procedure di prova per la determinazione delle grandezze. La quantità di bitume è stabilita in funzione della superficie specifica degli inerti, della lavorabilità e delle condizioni ambientali (in base alla temperatura media della zona varia il tipo di bitume) in cui dovrà essere impiegato il conglomerato bituminoso, con percentuali che generalmente sono comprese tra il 4% e il 5% per gli strati di collegamento.



Figura 22: Processo nello studio della miscela

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

CAPITOLO 2: Programma sperimentale

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

L’obiettivo del programma sperimentale è quello di confrontare le caratteristiche meccaniche e prestazionali di differenti tipologie di conglomerato bituminoso, realizzate variando la composizione granulometrica degli aggregati, il dosaggio e la tipologia del legante cementizio, il dosaggio e la tipologia di emulsione bituminosa e l’utilizzo parziale o totale nonché l’assenza di materiale riciclato (RAP). Inoltre, sono state realizzate delle miscele destinate alla valutazione della resistenza al taglio all’interfaccia tra due lastre di materiale testate con la prova Leutner.

Nella fattispecie, i parametri di confronto che verranno analizzati sono:

1. il modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) a 7 e 14 giorni;
2. la resistenza a trazione indiretta (ITS) a 7 e 14 giorni;
3. resistenza al taglio all’interfaccia

La sperimentazione si è svolta in quattro fasi principali:

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

Ultimato l’iter sperimentale, si è proceduto con la fase di elaborazione dei dati ottenuti e al confronto dei risultati, per poter valutare quale tra le possibili combinazioni delle componenti della miscela ottimizzasse i parametri precedentemente menzionati.

Di seguito si riporterà un breve elenco comprensivo delle miscele realizzate e testate con i rispettivi dosaggi dei componenti suddetti.

Tipo legante	% cemento	Tipo emulsione	% emulsione	% fresato	% acqua
CVR	18,0%	B	7,0%	0%	6,5%
CEMENTO	22,0%	B	7,0%	0%	7%
CVR	18,0%	A	7,0%	0%	7%
CEMENTO	22,0%	A	7,0%	0%	7%
CVR	13,0%	A	7,0%	0%	6%
CVR	13,0%	A	5,0%	0%	6%
CVR	13,0%	A	7,0%	100%	6,5%
CVR	13,0%	A	5,0%	100%	6%
CVR	18,0%	A	7,0%	100%	6,5%
CVR	18,0%	B	7,0%	100%	7%
CVR	25,0%	A	5,0%	0%	7,5%
CVR	25,0%	A	8,0%	0%	7,5%
CVR	18,0%	A	7,0%	50%	8%
CEMENTO	22,0%	A	7,0%	100%	6,5%
CVR	30,0%	A	5,0%	0%	8%
CVR	30,0%	A	8,0%	0%	9%

Figura 23: Miscele realizzate

2.1 MATERIALI

In questo capitolo, verrà fornita una descrizione dei vari materiali, per poi passare ai dettagli relativi alle miscele in questione. Gli aggregati lapidei sono particelle granulari di origine minerale, che trovano impiego nelle costruzioni stradali, sia in forma sciolta sia in combinazione con leganti di varia natura e tipologia. Il processo di qualificazione degli aggregati coinvolge diversi elementi. Questi comprendono, da un lato la caratterizzazione del materiale attraverso lo svolgimento di prove sperimentali per la determinazione delle principali proprietà fisiche, chimiche e meccaniche, dall'altro la definizione di opportuni criteri di classificazione e accettazione, in relazione alla destinazione d'uso finale. Gli aggregati lapidei hanno origine dalle rocce e possono trovarsi in depositi naturali (soprattutto sotto forma di sabbie e ghiaie), formatisi attraverso un complesso insieme di fenomeni chimico-fisici, oppure essere prodotti mediante estrazione da cava. Oltre agli aggregati lapidei, esistono anche altri prodotti di origine artificiale o da riciclo, utilizzati in tutto o in parte come aggregati nelle costruzioni; si citano al riguardo le scorie ottenute da processi industriali, i detriti derivanti da demolizioni edilizie, il materiale fresato ricavato da pavimentazioni esistenti, i rifiuti di varia natura. Tali materiali alternativi, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie e in ragione di istanze di carattere ambientale, sono sempre più diffusi in campo stradale.

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

- ignee;
- sedimentarie;
- metamorfiche.

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

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

Le rocce sedimentarie invece, derivano da processi esogeni e si trovano generalmente in forma stratificata per effetto degli effetti di sedimentazione. Le rocce metamorfiche invece, derivano da rocce ignee o sedimentarie derivanti entrambe dall'azione di calore, pressione e attività chimiche che ne hanno alternato la struttura minerale, rendendola differente da

quella originale. Gli aggregati rappresentano la fase solida dei conglomerati e sono costituiti da particelle granulari di origine minerale, le quali costituiscono l'80-85% del volume delle miscele e circa il 95% del peso. La prima tipologia di materiale descritto è l'aggregato calcareo, presente nella miscela della presente sperimentazione. Il calcare è una roccia sedimentaria costituita essenzialmente da calcite, un minerale formato da carbonato di calcio (CaCO_3). La forma e la giacitura di queste rocce, cioè il modo in cui sono disposte rispetto alla superficie terrestre, risentono delle caratteristiche del loro processo di formazione e di eventuali successivi fenomeni di deformazione. I processi di formazione delle rocce calcaree differiscono sostanzialmente per l'origine dei sedimenti costituenti: questi, infatti, possono derivare (calcari organogeni) da gusci o da esoscheletri, cioè dagli scheletri esterni di organismi che vivono nelle acque dei mari e degli oceani. L'estrazione di questo materiale avviene prevalentemente in cave lungo corsi d'acqua e sono presenti più o meno in tutte le regioni italiane.

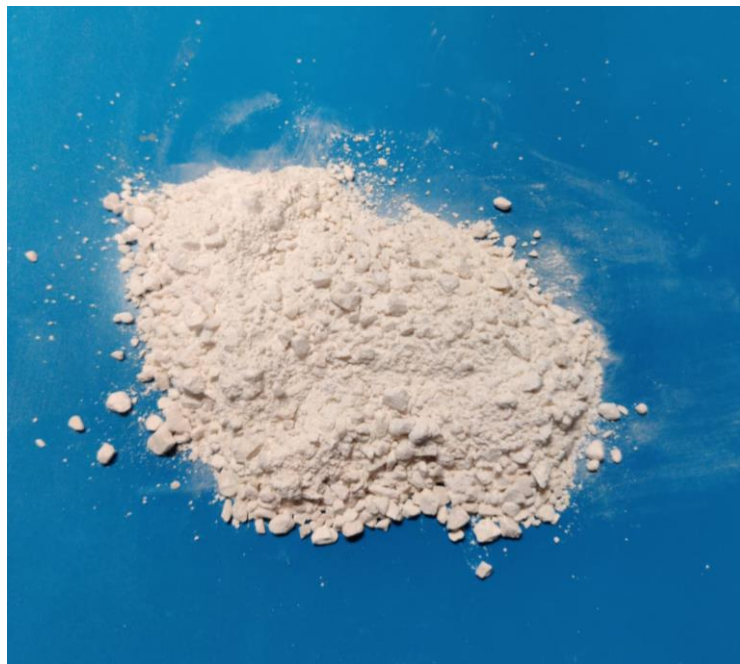


Figura 24: Sabbia 0/6

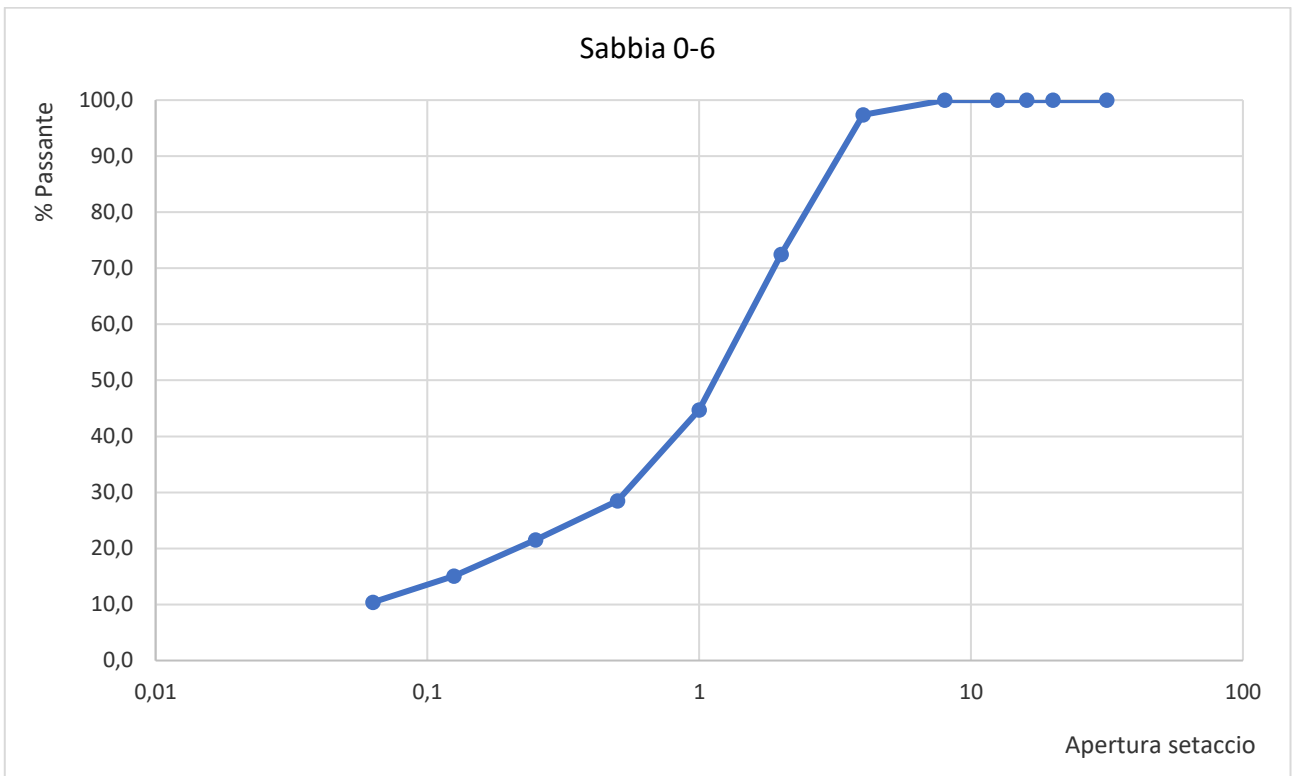
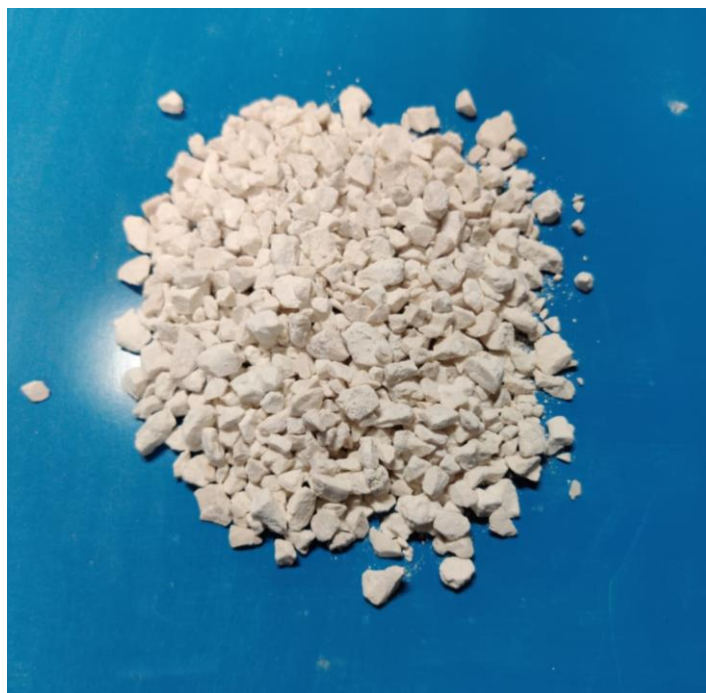


Figura 25: Granulometria sabbia 0-6



Figuraa 26: Graniglia 4/8

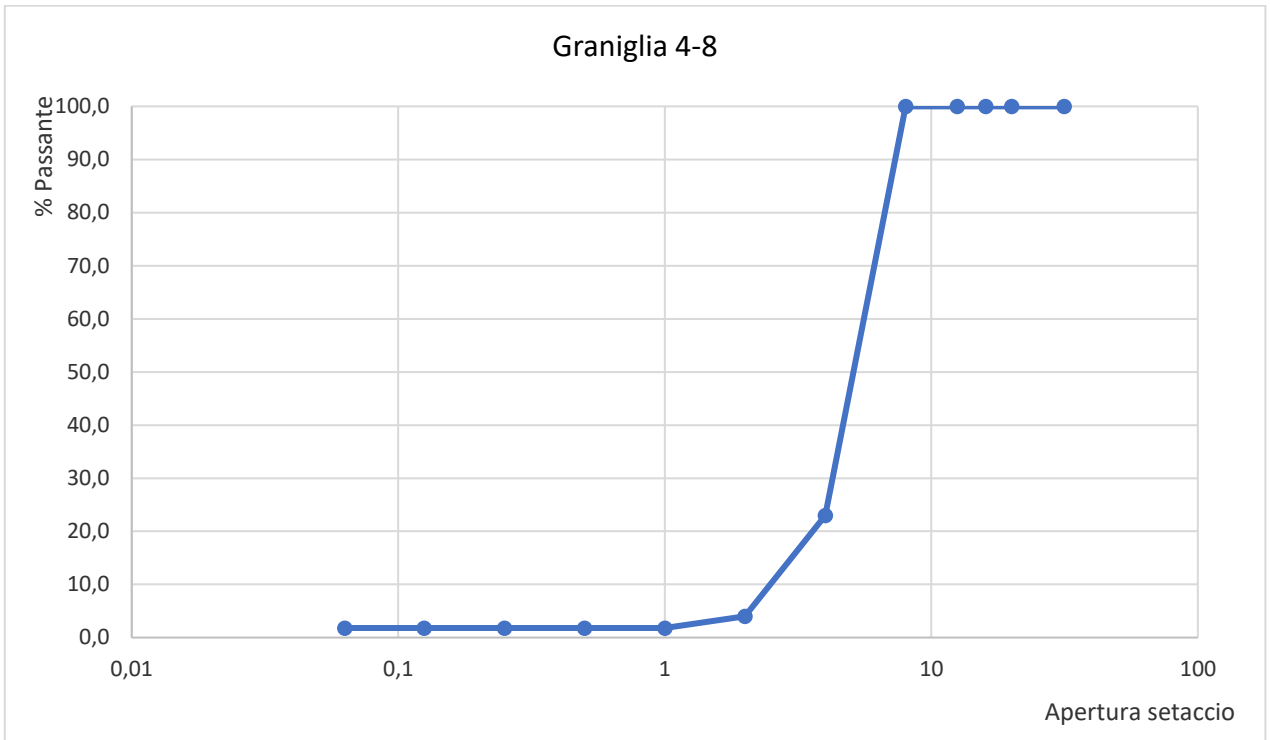


Figura 27: Granulometria graniglia 4/8

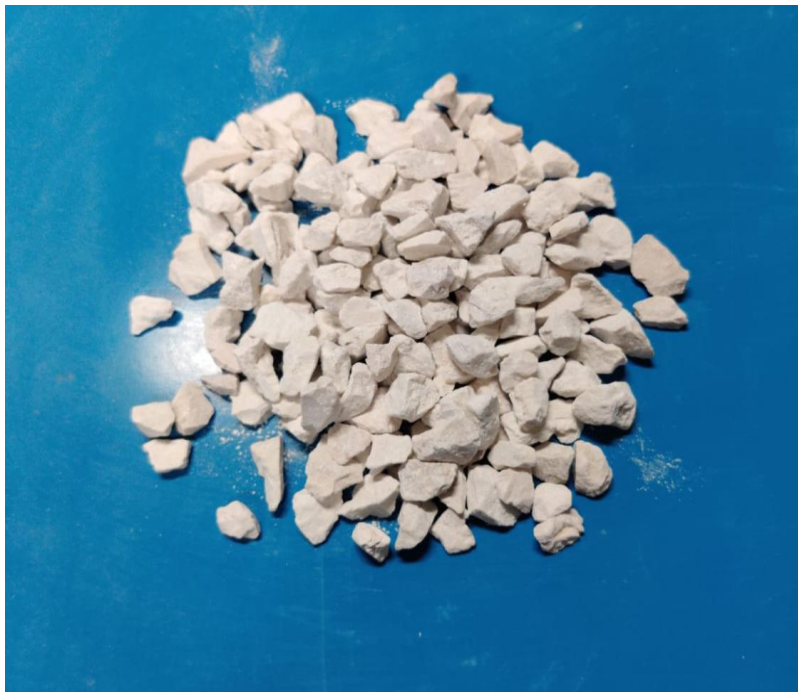


Figura 28: Pietrisco 8/12

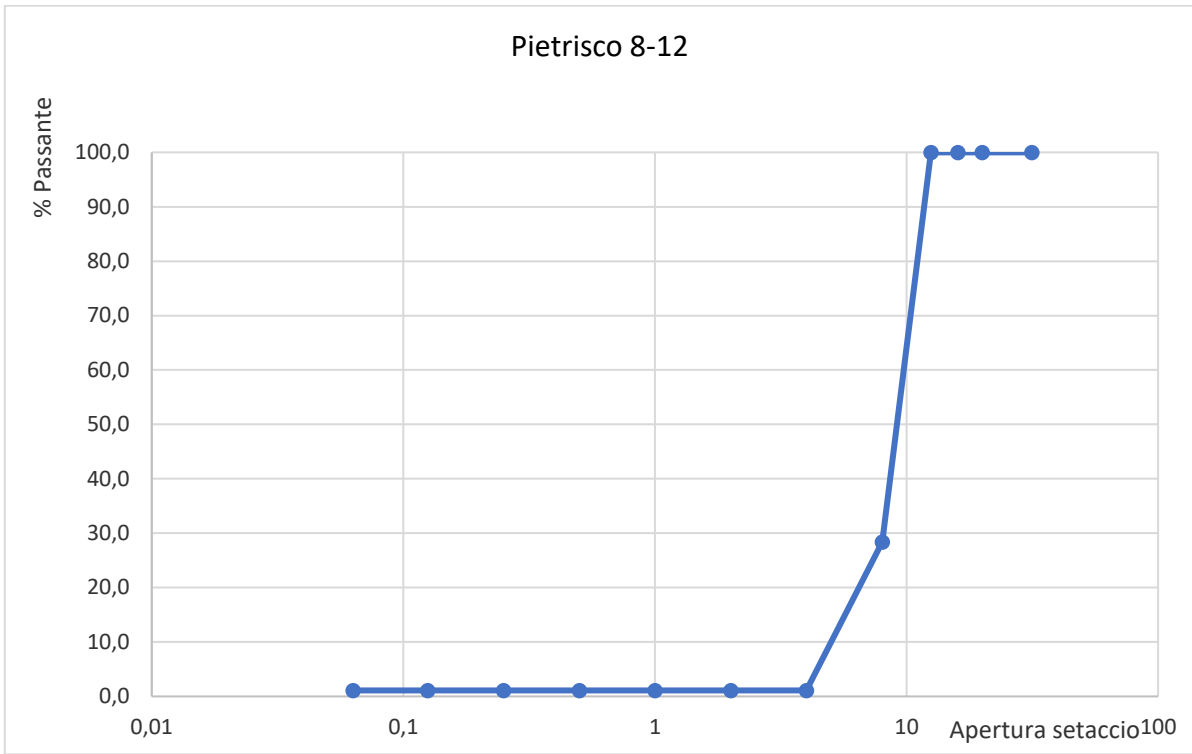


Figura 29: granulometria pietrisco 8/12



Figura 30: Pietrisco 12/25

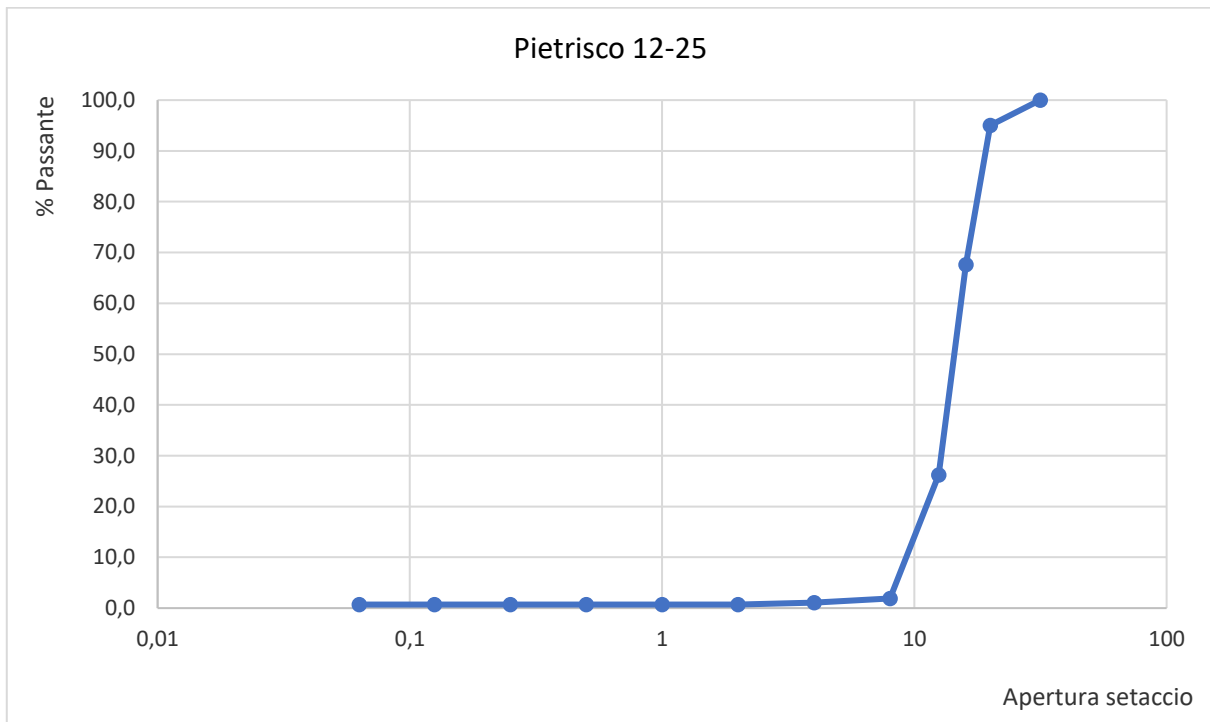


Figura 31: granulometria pietrisco 12/25

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



Figura 32: Filler Attivo CVR

Un altro ingrediente fondamentale è il cemento, con cui si è realizzato diverse ricette al fine di valutare eventuali differenze con il filler precedentemente descritto; nella fattispecie si è usato il cemento Portland al calcare 32,5 R.



Figura 33: Cemento Portland al calcare 32,5 R

Infine, di particolare importanza è stata anche l'emulsione bituminosa. Allo scopo di determinare la migliore ricetta in termini di modulo ITSM e alla resistenza alla trazione indiretta ITS, si è voluto valutare due differenti emulsioni al 60% di bitume residuo prodotte da due diverse aziende, chiamate in questo caso emulsione A e B.



Figura 34: Emulsione bituminosa al 60%

2.2 MISCELAZIONE E COMPATTAZIONE DEI PROVINI

In fase di mix design, si sono ricavati i quantitativi delle differenti pezzature di aggregato, filler attivo/cemento, emulsione bituminosa e di acqua necessarie a realizzare i provini adottando una nomenclatura alfanumerica che facilitasse il riconoscimento durante tutte le fasi dello svolgimento dell'attività sperimentale. Nel dettaglio, la prima sigla indica la tipologia di filler (CVR o REF) a seconda se si tratta di filler attivo oppure cemento 32,5 R; la lettera seguente (V,R, 50/50) invece, sta ad indicare se la miscela contiene rispettivamente aggregati vergini, 100% di fresato oppure metà dell'uno e metà dell'altro; i due numeri successivi indicano rispettivamente il dosaggio di filler/cemento all'interno della miscela e il dosaggio di emulsione bituminosa, mentre l'ultima sigla sta ad indicare la tipologia di emulsione (A o B). A titolo di esempio puramente indicativo la prima miscela realizzata è stata CVR_V_18.7_A stante a significare: impasto contenente filler attivo CVR con aggregati vergini, 18% di legante e 7% di emulsione A.

Di seguito verranno elencate le ricette realizzate in questa sperimentazione e in particolare per "Acqua totale" si intenderà la quota parte di acqua derivante dall'emulsione bituminosa e la parte derivante dall'aggiunta di acqua stessa.

CVR_V_18_7_A			CVR_V_18_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Sabbia 0/6	40,0%	2202,2
Emulsione A	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1073,6
Inerti	68,8%	5297,6	Pietrisco 8/12	8,0%	440,4
Acqua Totale	6,5%	500,5	Pietrisco 12/25	32,5%	1789,3
	100,0%	7700		100,0%	5505,5

CVR_V_18_7_B			CVR_V_18_7_B		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Sabbia 0/6	40,0%	2202,2
Emulsione B	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1073,6
Inerti	68,8%	5297,6	Pietrisco 8/12	8,0%	440,4
Acqua Totale	6,5%	500,5	Pietrisco 12/25	32,5%	1789,3
	100,0%	7700		100,0%	5505,5

REF_V_22_7_A			REF_V_22_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	22,1%	1701,7	Sabbia 0/6	40,0%	2051,3
Emulsione A	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1000,0
Inerti	64,0%	5128,2	Pietrisco 8/12	8,0%	410,3
Acqua Totale	7,0%	338,8	Pietrisco 12/25	32,5%	1666,7
	100,0%	7700		100,0%	5128,2

REF_V_22_7_B			REF_V_22_7_B		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	22,1%	1701,7	Sabbia 0/6	40,0%	2051,3
Emulsione B	6,9%	531,3	Graniglia 4/8	19,5%	1000,0
Inerti	64,0%	5128,2	Pietrisco 8/12	8,0%	410,3
Acqua Totale	7,0%	338,8	Pietrisco 12/25	32,5%	1666,7
	100,0%	7700		100,0%	5128,2

CVR_V_13_7_A			CVR_V_13_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,42%	1027,95	Sabbia 0/6	40,0%	2331,6
Emulsione A	7,19%	550,55	Graniglia 4/8	19,5%	1136,6
Inerti	73,40%	5828,9	Pietrisco 8/12	8,0%	466,3
Acqua Totale	6,00%	250	Pietrisco 12/25	32,5%	1894,4
	100,0%	7657,4		100,0%	5828,9
CVR_V_13_5_A			CVR_V_13_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,4%	1027,95	Sabbia 0/6	40,0%	2391,6
Emulsione A	5,2%	400,4	Graniglia 4/8	19,5%	1165,9
Inerti	75,9%	5979,1	Pietrisco 8/12	8,0%	478,3
Acqua Totale	5,5%	260,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1943,2
	100,0%	7667		100,0%	5979,1
CVR_R_13_7_A			CVR_R_13_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,4%	1027,95	Filler Recupero	5,0%	291,4
Emulsione A	7,2%	550,55	Grosso Lucidi	55,0%	3205,9
Inerti	73,0%	5828,9	RAP Perugia	40,0%	2331,6
Acqua Totale	6,5%	285,0		100,0%	5828,9
	100,0%	7692,4			
CVR_R_13_5_A			CVR_R_13_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	13,4%	1027,95	Filler Recupero	5,0%	299,0
Emulsione A	5,2%	400,4	Grosso Lucidi	55,0%	3288,5
Inerti	75,4%	5979,1	RAP Perugia	40,0%	2391,6
Acqua Totale	6,0%	300,0		100,0%	5979,1
	100,0%	7707			

CVR_R_18_7_A			CVR_R_18_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	17,7%	1370,6	Filler Recupero	5,0%	275,3
Emulsione A	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	55,0%	3028,0
Inerti	68,9%	5505,5	RAP Perugia	40,0%	2202,2
Acqua Totale	6,5%	320,0		100,0%	5505,5
	100,0%	7727			
CVR_R_18_7_B			CVR_R_18_7_B		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Filler Recupero	5,0%	275,3
Emulsione B	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	55,0%	3028,0
Inerti	68,3%	5505,5	RAP Perugia	40,0%	2202,2
Acqua Totale	7,0%	300,0		100,0%	5505,5
	100,0%	7707,4			
CVR_50/50_18_7_A			CVR_50/50_18_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	17,8%	1370,6	Filler Recupero	2,5%	137,6
Emulsione A	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	27,5%	1514,0
Inerti	67,3%	5505,5	RAP Perugia	20,0%	1101,1
Acqua Totale	8,0%	275,0	Sabbia 0/6	20,0%	1101,1
	100,0%	7682,4	Graniglia 4/8	9,8%	536,8
			Pietrisco 8/12	4,0%	220,2
			Pietrisco 12/25	16,3%	894,6
				100,0%	5505,5
REF_R_22_7_A			REF_R_22_7_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)	m [g]	
Filler reattivo	22,2%	1701,7	Filler Recupero	5,0%	256,4
Emulsione A	6,9%	531,3	Grosso Lucidi	55,0%	2820,5
Inerti	64,4%	5128,2	RAP Perugia	40,0%	2051,3
Acqua Totale	6,5%	300,0		100,0%	5128,2
	100,0%	7661			

CVR_V_25_5_A			CVR_V_25_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	24,9%	1925	Sabbia 0/6	40,0%	2002,0
Emulsione A	5,0%	385	Graniglia 4/8	19,5%	976,0
Inerti	62,6%	5005,0	Pietrisco 8/12	8,0%	400,4
Acqua Totale	7,5%	420,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1626,6
	100,0%	7735		100,0%	5005,0
CVR_V_25_8_A			CVR_V_25_8_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	25,0%	1925	Sabbia 0/6	40,0%	1940,4
Emulsione A	8,0%	616	Graniglia 4/8	19,5%	945,9
Inerti	59,5%	4851,0	Pietrisco 8/12	8,0%	388,1
Acqua Totale	7,5%	300,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1576,6
	100,0%	7692		100,0%	4851,0
CVR_V_30_5_A			CVR_V_30_5_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	30,0%	2310	Sabbia 0/6	40,0%	1786,4
Emulsione A	5,0%	385	Graniglia 4/8	19,5%	870,9
Inerti	57,0%	4466,0	Pietrisco 8/12	8,0%	357,3
Acqua Totale	8,0%	475,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1451,5
	100,0%	7636		100,0%	4466,0
CVR_V_30_8_A			CVR_V_30_8_A		
	%	m [g]	% aggregati (rispetto alla miscela degli aggregati)		m [g]
Filler reattivo	30,00%	2310	Sabbia 0/6	40,0%	1724,8
Emulsione A	8,00%	616	Graniglia 4/8	19,5%	840,8
Inerti	53,00%	4081,0	Pietrisco 8/12	8,0%	345,0
Acqua Totale	9,00%	693,0	Pietrisco 12/25	32,5%	1401,4
	100,0%	7700		100,0%	4312,0

Figure 35-41: Ricette

Ai fini della realizzazione dei provini si inizia pesando gli aggregati vergini o il fresato, il cemento o il filler a seconda della ricetta da realizzare, tramite un'apposita bilancia, la quale è stata utilizzata per ogni miscela, così da eliminare errori derivanti dall'utilizzo di più apparecchiature, seguiti dalla preparazione delle giuste quantità di emulsione bituminosa e acqua.



Figura 42: Pesatura aggregati

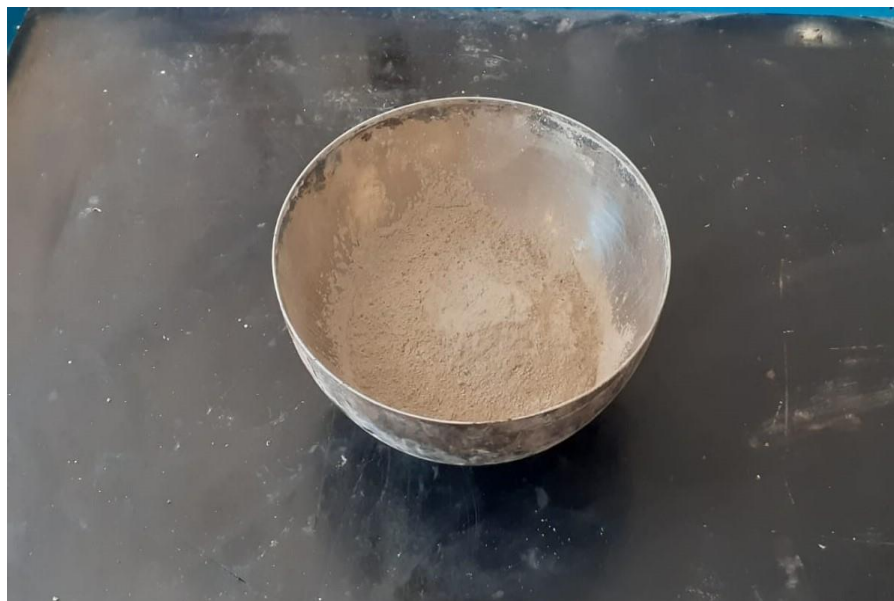


Figura 43: Pesatura Filler attivo CVR/ cemento 32,5 R

Una volta terminata questa fase, si procede alla miscelazione degli inerti per un minuto circa mediante l'utilizzo di un'impastatrice meccanica dotata di cestello rimovibile. Al raggiungimento di un colore omogeneo, si è aggiunta l'acqua e si è mescolato per un altro minuto. La procedura si conclude versando anche l'emulsione bituminosa e miscelando per la stessa durata delle fasi precedenti.

Essendo una procedura innovativa e non avendo certezze sul corretto dosaggio delle componenti dell'impasto, durante tutto lo svolgimento delle attività di tirocinio, è stato necessario valutare di volta in volta se il quantitativo di acqua fosse adatto, ossia non troppo elevato poiché avrebbe reso impossibile la compattazione e non troppo basso poiché il materiale sarebbe operativamente non lavorabile. Questo problema è stato risolto ritenendo che il quantitativo corretto fosse quello che stringendo un gruzzolo di materiale con la mano, esso risultasse sufficientemente agglomerabile e che lasciasse la mano umida ma non bagnata.

Terminata anche l'ultima fase della miscelazione, si estrae il recipiente dell'impastatrice e attraverso l'utilizzo di una bilancia, si andrà a mettere in ognuna delle tre fustelle 2400 grammi di materiale con l'accortezza di aggiungere all'interno di esse sia dei dischi di carta utili al riconoscimento della miscela, sia del grasso in modo tale da facilitare la fase di estrazione che successivamente verrà descritta. La buona prassi richiede di coprire con un panno umido il recipiente nelle fasi di preparazione delle fustelle affinché l'impasto non perda acqua durante la presa del legante cementizio.



Figura 44, 45: Miscelazione di aggregati più cemento/filler; Aggiunta di acqua all'impasto



Figura 46, 47: Impasto miscelato con acqua; Aggiunta di emulsione bituminosa



Figura 48, 49: Impasto miscelato con emulsione; Prodotto terminato e pronto alla compattazione

La stessa procedura di miscelazione è stata inoltre utilizzata per la realizzazione di alcune lastre di materiale da testare (dopo aver effettuato un carotaggio), mediante prova Leutner. La ricetta usata è stata CVR_V_25.5_A e una volta terminata la miscelazione, è stato versato il materiale all'interno di un cassero componibile in acciaio di dimensioni 30x30 cm, compattato mediante apposito macchinario alla pressione di 600 kPa con 20 passate e lasciato coperto con un panno umido per circa una settimana in modo da favorire il fenomeno della presa e dell'indurimento del cemento.



Figura 50, 51: Cassero in acciaio 30x30 cm; Compattatore meccanico



Figura 52, 53: Compattazione in opera

Al raggiungimento di un sufficiente grado di indurimento, all'interfaccia tra il primo strato compattato ed indurito, è stata posizionata una rete avente lo scopo di migliorare la resistenza a taglio della lastra. Infine, avendo cura di segnare sul cassero la direzione di compattazione e la posizione della rete, si è versato il secondo strato successivamente compattato con lo stesso macchinario e le stesse condizioni di pressione e cicli di carico del primo strato. Sulla lastra finale così ottenuta, e al raggiungimento del grado di indurimento sufficiente, sono stati previsti quattro carotaggi dal diametro di 94 mm: due provini contenenti la rete e due senza rete, al fine di valutare l'eventuale beneficio che essa possa garantire.



Figura 54, 55: Prodotto compattato finito

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



Figura 56: Pressa giratoria a taglio

Il macchinario è dotato di un sistema di acquisizione e controllo dei dati attraverso un display ed è possibile impostare se la prova debba avvenire a numero di giri imposto o ad altezza imposta. In primis va impostata la pressione verticale costante (600 kPa), il diametro della fustella utilizzata (100 mm) mentre, per la compattazione dei provini, si procede andando ad impostare il numero di giri (100 giri) e grazie al pannello di controllo, si informa l'altezza ottenuta. Una volta che la fustella è pronta, viene rapidamente trasportata all'interno del telaio di carico, si posiziona sul piano, si gira fino a farla aderire ad una barra metallica e si avvia la prova tramite il pannello di controllo, premendo il tasto "START".

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

- Pressione: 600 KPa;
- Diametro della piastra: 100 mm;
- Numero di giri: 60.

Una volta iniziata la prova, il pistone scende lentamente comprimendo il materiale tramite la pressione fissata. Grazie ai sostegni laterali, la fustella si inclina e inizia a ruotare fino al raggiungimento del numero di giri preimpostato. Terminata la prova, il pistone risale, dando la possibilità di estrarre la fustella con all'interno il provino compattato. Si conclude la preparazione dei provini grazie all'estrazione effettuata tramite un martinetto idraulico, che lo solleva verso l'alto. Infine, quest'ultimi vengono pesati e messi a maturare in camera climatica a 20° con l'accortezza di posare su di essi un panno umido e di bagnarlo ogni qual volta si asciughi, in attesa che si raggiungano i sette e quattordici giorni per l'esecuzione delle prove ITSM e ITS.



Figura 57, 58: compattazione in opera; Estrazione provino mediante pressa idraulica

2.3 DETERMINAZIONE DELLA COMPATTABILITA' DEI PROVINI

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

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

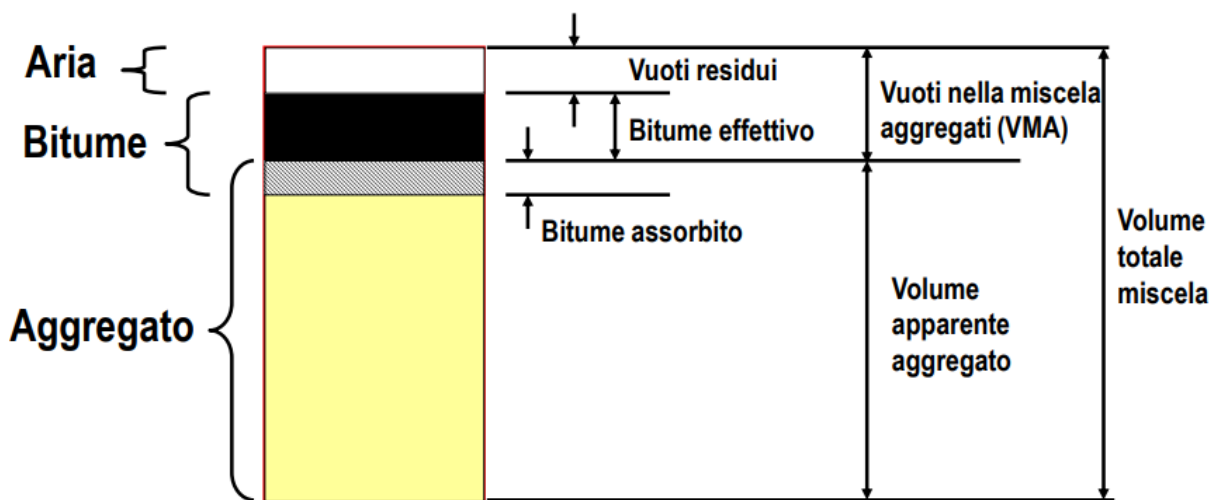


Figura 59: fasi conglomerato bituminoso

2.4 PROVA DI MODULO A TRAZIONE INDIRECTA (ITSM)

La prima prova di caratterizzazione meccanica svolta sulle miscele, è stata mirata alla misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM). Per la misurazione di questo modulo, è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester). Questo macchinario imprime un carico di compressione lungo una direzione e tramite dei trasduttori consente di misurare la deformazione a 90°, rispetto al punto di applicazione del carico. Le modalità di sperimentazione, effettuata mediante questa apparecchiatura, sono stabilite dalla normativa UNI EN 12697-26 che impone una deformazione preimpostata. Per ogni provino è previsto che la prova venga effettuata su due diametri, con un'inclinazione tra essi di 90°. Dunque, la misura del modulo di rigidezza avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta, in cui il provino non è portato a rottura.

I parametri della prova sono regolati e controllati mediante un software, attraverso il quale si possono settare: il tempo di picco (rise time=124 ms), il carico fissato (20 KN), la deformazione di target fissata (in questo caso 3 μm) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson (0,35) e la temperatura della prova (20° gradi per le prove a 7 giorni e variato tra 5-20-40° per le prove a quattordici giorni, grazie alla presenza di un termometro). Questi parametri da definire sono tarati prima della fase di condizionamento, procedendo la vera e propria prova. Il modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso caratterizza la capacità di una miscela di deformarsi in conseguenza a delle tensioni dovute all'applicazione di un carico. Il parametro ITSM definisce al meglio il comportamento meccanico e reologico dei conglomerati bituminosi.

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

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

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

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

dove:

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

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

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

dove:

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

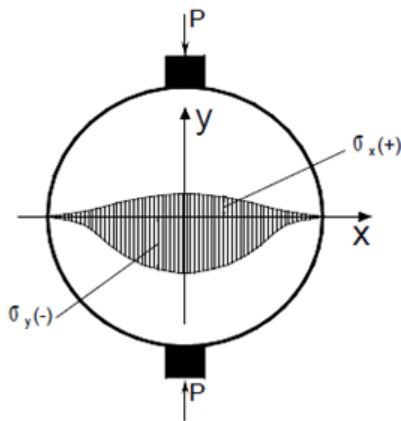


Figura 60: Stato sollecitante del provino sottoposto durante la prova

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

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

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

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

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

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

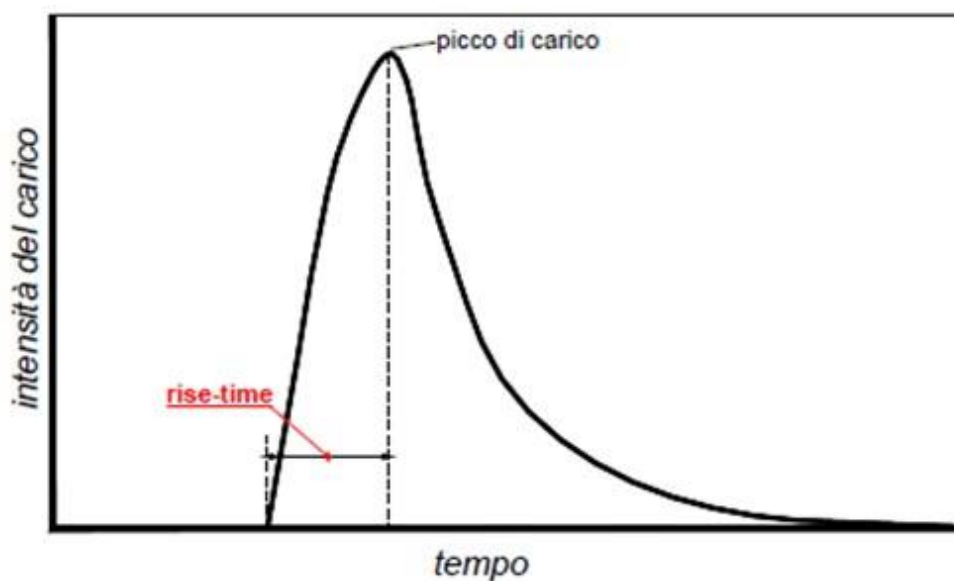


Figura 61: applicazione del carico in funzione del tempo

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

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

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

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

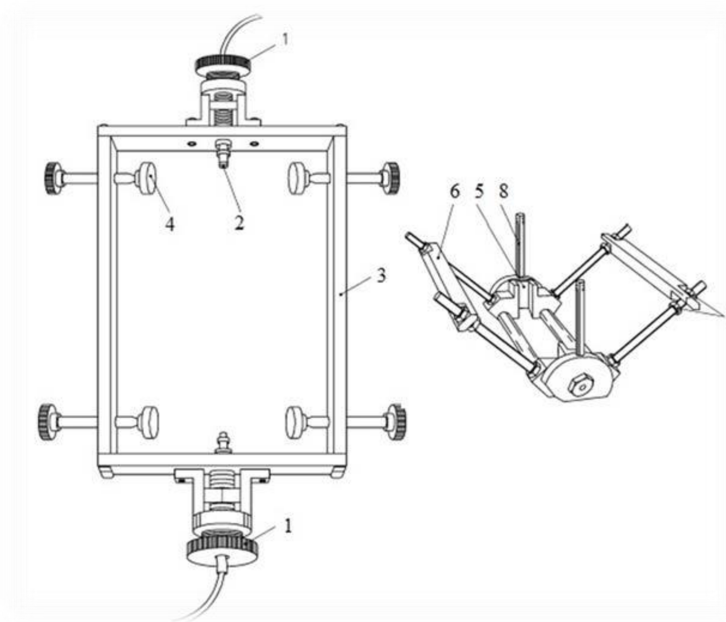


Figura 62: strumento utilizzato all'interno del NAT

Uno degli elementi principali del NAT, è la cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 KN. Essa è collegata al pistone che permette l'applicazione del carico alla testa

di carico che è a contatto sul provino. Inoltre, la cella di carico è anche collegata al computer attraverso il quale si possono sia registrare i dati, ma anche controllare le modalità di svolgimento della prova andando a regolare il funzionamento della cella di carico.

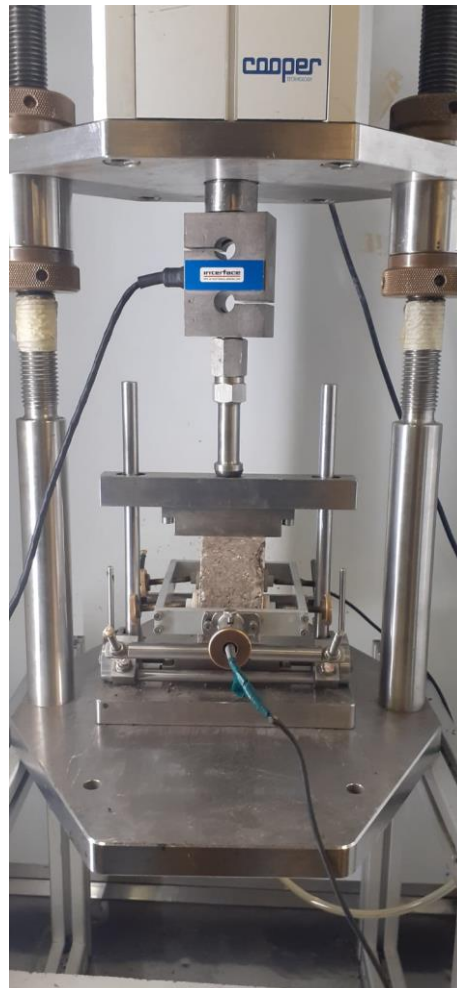


Figura 63: cella di carico NAT

La corretta posizione del pistone, si ha in funzione delle dimensioni del provino testato, in questo caso 100mm. Il sistema di contrasto è collegato rigidamente a delle viti che ne permettono lo scorrimento verso l'alto se invece il provino è di 150mm. All'interno della cella di carico poi viene inserito il castelletto con i rispettivi trasduttori, iniziando quindi il procedimento nel computer. Tramite il collegamento di quest'ultimi al computer, è possibile misurare con elevata precisione le deformazioni del campione testato, a seguito della

sollecitazione applicata sullo stesso. Il tutto è contenuto in una camera climatica per regolare la temperatura di prova.

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

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



Figura 64: determinazione altezza media del provino tramite calibro

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

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

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

Si passa dopodiché alla schermata del controllo dei trasduttori, che vengono posizionati all'interno delle viti (elemento n°1 della figura 53), andando a favorire il contatto con il

provino. Andando poi a ruotare quest'ultime si allenta l'aderenza con esso, affinché le frecce sul software siano rosse. Infine, vengono abbassate le leve (elemento n°8 della figura 53), per non andare ad influenzare il risultato della prova, facendo avviare i 10 colpi di precarico che anticipano i 5 impulsi finali. Per ogni impulso, il software registra tutti i parametri in precedenza descritti con i rispettivi valori medi, ottenendo così il modulo elastico a trazione indiretta del provino di ogni miscela.

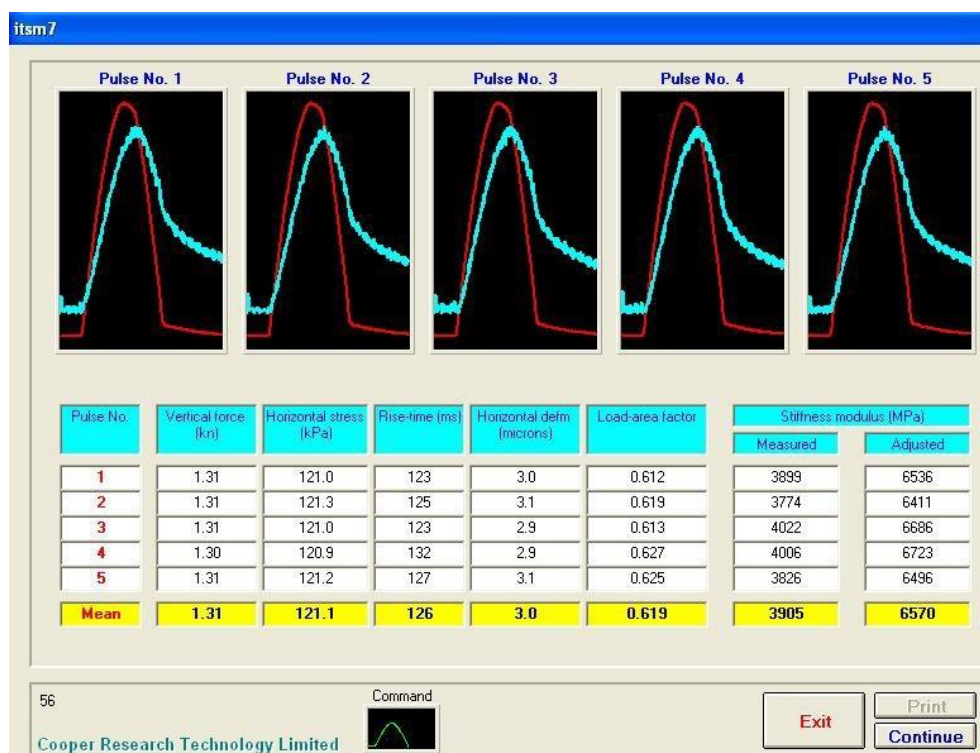


Figura 65: schermata finale con valori di ITSM

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

2.5 PROVA DI TRAZIONE INDIRECTA (ITS)

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

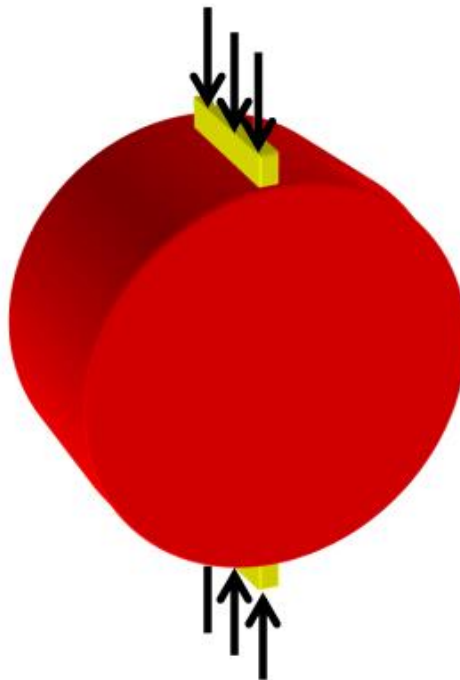


Figura 66: Applicazione del carico al provino

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

Il carico viene trasferito al provino da due listelli, con queste dimensioni:

- larghezza: 15 ± 2 mm;

- spessore: 4 ± 1 mm;
- lunghezza \geq della lunghezza della linea di contatto del provino.

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

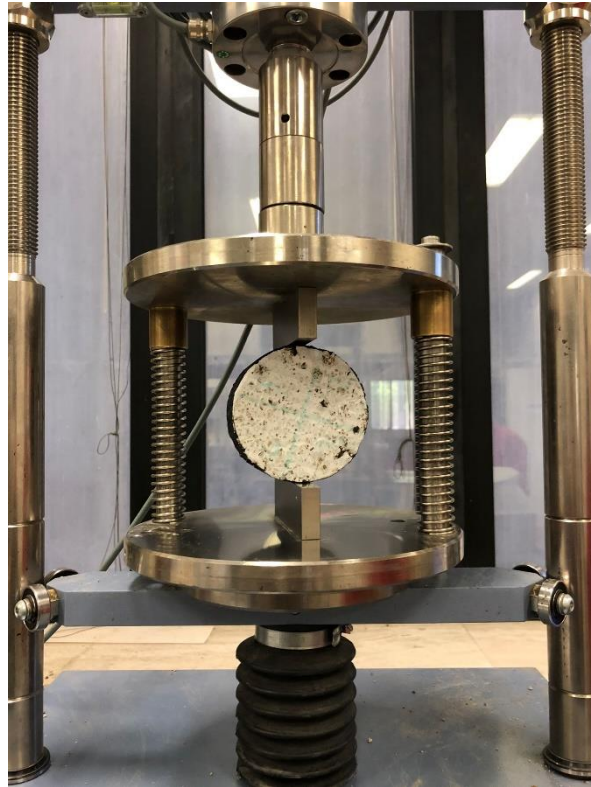


Figura 67: posizione centrale provino tra i due listelli

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

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

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

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



Figura 68: rottura del provino

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

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

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

dove:

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

Un altro parametro che verrà riportato tra i risultati è il CTI (coefficiente di trazione indiretta) definito come:

$$CTI = \frac{\pi \cdot ITS}{2 \cdot \varepsilon}$$

dove:

- ITS = Indirect Tensile Strength [MPa]
- ε = deformazione massima del provino [%]

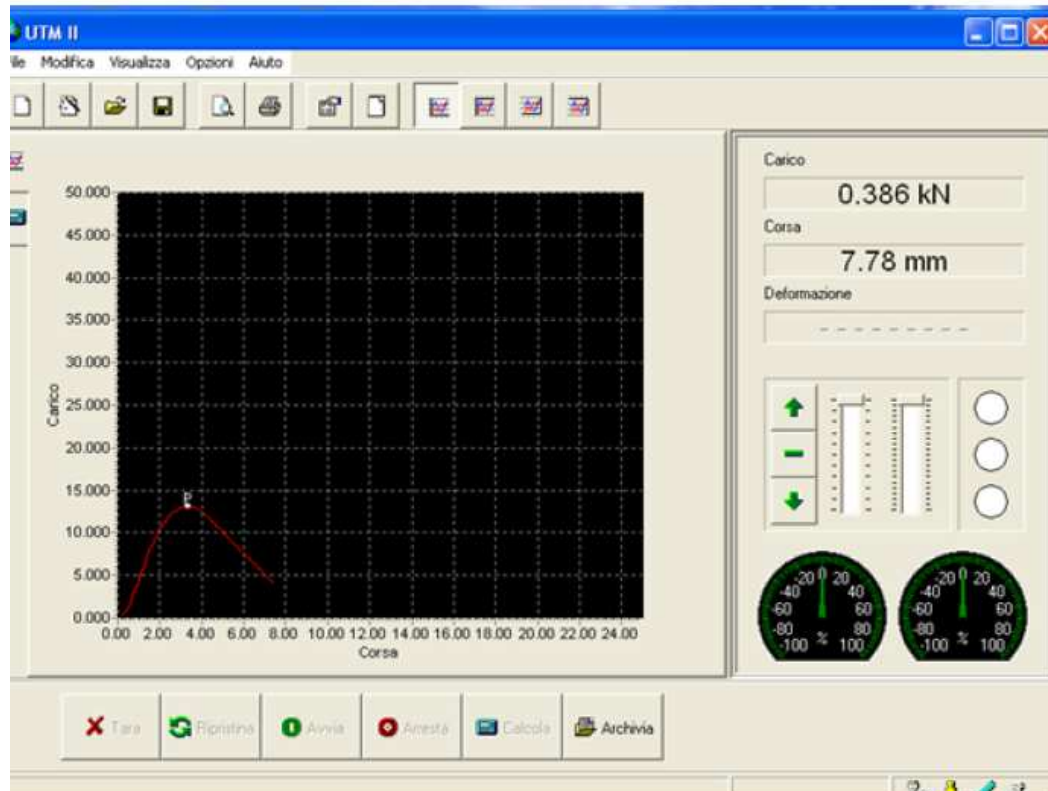


Figura 69: software UTM II

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

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

2.6 PROVA LEUTNER

Tra i fenomeni di degrado delle pavimentazioni stradali, il distacco tra gli strati di conglomerato bituminoso del pacchetto è forse quello che, in passato, ha ricevuto minor attenzione da parte dei tecnici del settore. A differenza dei fenomeni di fessurazione ed ormaio che, pur avendo spesso origine da carenze interne della sovrastruttura, si manifestano sul piano viabile per stadi successivi di ammaloramento, il distacco tra gli strati non è direttamente visibile se non quando si verifica tra i due strati più superficiali con il loro reciproco slittamento e/o l'asportazione di conglomerato bituminoso. Ciò non significa, tuttavia, che il fenomeno non sia dannoso o che partecipi in misura minore al deterioramento della pavimentazione. Trattandosi del collegamento esistente alle interfacce tra strati bituminosi e trovandosi queste al di sotto della superficie viabile, risulta effettivamente difficile individuarne e valutarne la mancanza se non attraverso la realizzazione di carotaggi che interessino più strati. Alla stregua delle fessurazioni bottom-up che si manifestano in superficie quando il danno è ormai completo, anche il distacco tra lo strato superficiale e quello sottostante si manifesta, nella maggior parte dei casi, con la separazione di porzioni più o meno estese di conglomerato bituminoso. Esistono poi casi nei quali il fenomeno di distacco è accentuato al punto che intere zone del conglomerato bituminoso sovrastante scronano rispetto a quello sottostante, allo stesso modo in cui un tappeto domestico può scivolare su un pavimento.

La metodologia di prova distruttiva adottata per la realizzazione della presente sperimentazione è una prova di taglio diretto su provini cilindrici doppio strato: il Leutner Shear Test. Esso può essere azionato da una tradizionale pressa Marshall da 5kN presente presso il Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche. Il Leutner statico costituisce la prova di riferimento per la valutazione del collegamento tra gli strati sia in Germania, sia in Svizzera essendo, nel primo caso citato nelle istruzioni di contratto per le prove sui materiali bituminosi (2312-1999: Asphalt Prüfung-ALP A-Stb Teil 4), nel secondo caso richiamato come test nelle norme per la costruzione delle pavimentazioni bituminose stradali svizzere (SN 617961). Tra i punti negativi attribuibili a Leutner il primo è certamente la variabilità dei risultati a parità di condizioni, legata soprattutto alle difficoltà di posizionamento dei provini all'interno dello strumento. Il secondo neo è la scarsa corrispondenza con le reali condizioni di carico su strada: il provino viene caricato sulla superficie laterale e non su quella corrispondente al piano viabile, ma, soprattutto, non vi è la riproduzione né dei carichi normali agenti in

concomitanza coi carichi taglianti, né dell'effetto di confinamento dato dal pacchetto stradale di origine ed inoltre, le velocità di somministrazione del carico non sono rappresentative delle dinamicità effettive. Infine, la particolare vicinanza dei semi-anelli metallici che definisce il piano di taglio comporta una notevole concentrazione degli sforzi in corrispondenza degli aggregati di bordo all'interfaccia che si ripercuote sulla bontà del test, sotto forma di non uniformità delle tensioni tangenziali sulla superficie di taglio e sotto forma di "effetto di assestamento" iniziale per molte delle curve di rottura registrate. Di seguito si fornisce una descrizione dell'apparecchiatura e della procedura di prova standardizzata.

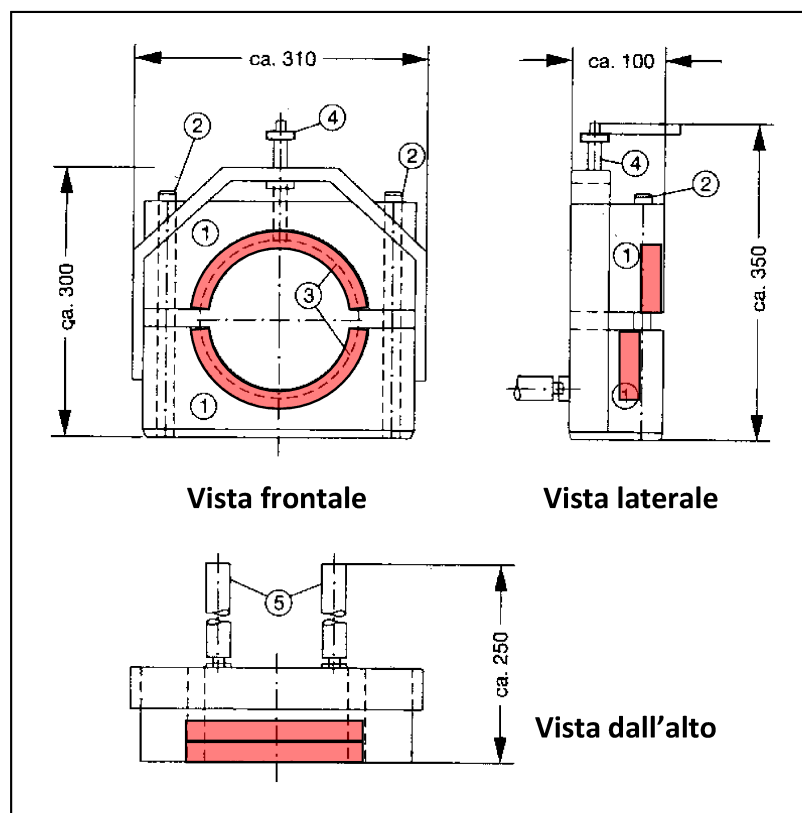


Figura 70: Schema tecnico del dispositivo Leutner

Il dispositivo schematizzato in figura è essenzialmente composto da due semi-anelli metallici (3) disposti in modo sfalsato l'uno rispetto all'altro, di cui quello superiore mobile e quello inferiore fisso. Il semi-anello superiore è solidale ad un supporto metallico a forma di U rovesciata (1) in grado di traslare verticalmente lungo due guide cilindriche (2) vincolate alla struttura inferiore del sistema, cui è collegato tramite viti il semi-anello inferiore. Nella vista laterale di figura è possibile notare come lo sfalsamento dei due semi-anelli generi un piano di taglio perfettamente definito: il gioco tra le due parti è di appena qualche decimo di millimetro. In posizione di riposo, la porzione superiore del meccanismo viene mantenuta a distanza da quella inferiore tramite due molle di contrasto inserite nelle guide cilindriche.

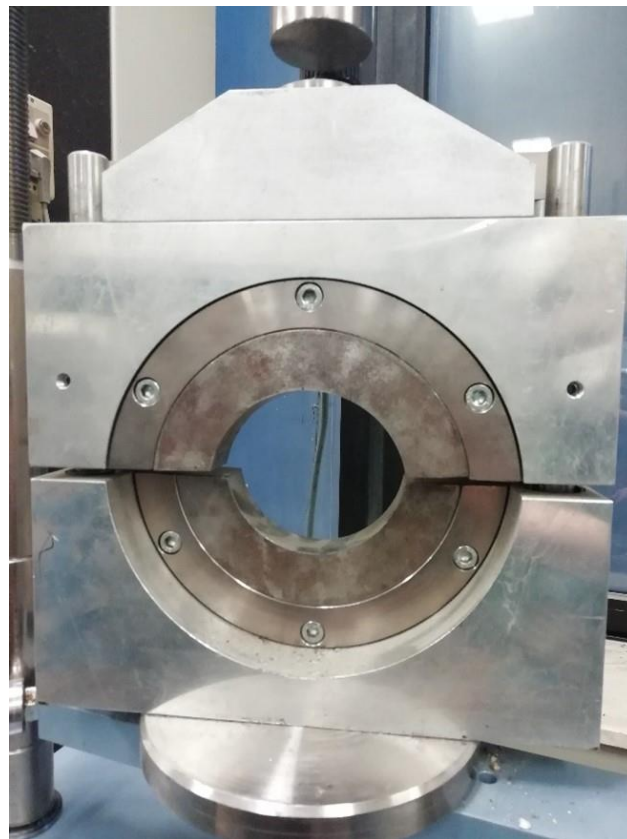


Figura 71: Dispositivo Leutner del laboratorio

Il provino multistrato cilindrico deve essere inserito con l'asse orizzontale all'interno del dispositivo, fino a far coincidere il piano di interfaccia con quello di taglio. Il vincolamento della carota avviene tramite una vite di serraggio posteriore (4) con la quale un apposito semi-anello di contrasto viene abbassato fino a bloccare la parte posteriore della carota. Questa, nel caso di provini di altezza elevata, sarà adagiata sui supporti metallici (5) regolabili per non creare momenti non desiderati. La figura mostra a sinistra il dispositivo collocato al di sotto del pistone di azionamento ed a destra un particolare dei due semi-anelli di taglio. Il Leutner necessita, per essere azionato, di una pressa funzionante a controllo di velocità in grado di imprimere alla parte mobile superiore uno spostamento di 50 millimetri al minuto verso il basso; essendo tale velocità identica a quella di una classica prova Marshall, ne consegue che, una qualsiasi pressa Marshall, può azionare il Leutner. Il pistone della pressa non insiste direttamente sul dispositivo, ma ai fini di ovviare alle possibili eccentricità degli assi, tra i due contrasti si frappone una sfera od una semi-sfera in acciaio in grado di riallineare il carico. Dalle fotografie in figura è ben visibile come i due semi-anelli metallici di taglio siano resi solidali ai supporti tramite viti a barilotto: la praticità di tale assemblaggio è legata alla possibilità di sostituire i semi-anelli all'occorrenza in funzione del diametro delle carote da sottoporre a prova. Tutta l'apparecchiatura può essere alloggiata per comodità all'interno di una cella climatica con la quale termostatare i campioni e condurre prove a temperature diverse da quelle standardizzate. La procedura di prova, infatti, prevede che l'esecuzione del test avvenga su provini sottoposti a termostatazione secca alla temperatura di 25°C per almeno 3 ore. Nel caso in cui non si ricorra all'impiego di una cella climatica, la procedura vuole che tra l'operazione di estrazione della carota dall'ambiente climatizzato e la fine del test non trascorrono più di dieci minuti, ciò allo scopo di evitare condizionamenti termici che potrebbero falsare la prova. Prima di inserire e bloccare la carota di prova nel Leutner, è raccomandabile eseguire l'operazione di individuazione della superficie di interfaccia tra gli strati, marcando la circonferenza corrispondente sulla superficie esterna della carota. Tale operazione, apparentemente semplice, può in alcuni casi dimostrarsi impegnativa ed è fondamentale per un corretto posizionamento del provino nel dispositivo. Dopo aver contrassegnato l'interfaccia e siglato gli strati, è possibile adagiare la carota orizzontalmente nel Leutner, avendo particolare cura nel fare combaciare il piano di taglio con la circonferenza appena marcata. Solitamente tale operazione deve tener conto anche dalla direzione di compattazione del conglomerato bituminoso in sito, cui è riferita una freccia opportunamente tracciata sulla superficie superiore dello strato, prima delle

operazioni di carotaggio. Un controllo richiesto dalle istruzioni di prova richiede che il piano di interfaccia sia il più possibil ortogonale all'asse longitudinale della carota: è ammessa una deviazione massima di 5 mm. Molti test non hanno successo proprio per il fatto che le carote non sono state prelevate correttamente o perché, anche nel caso in cui lo siano, le pendenze trasversali del conglomerato più superficiale sono tali da compromettere l'ortogonalità di cui sopra. La conseguenza di un non corretto posizionamento del provino entro il dispositivo di taglio comporta l'applicazione dell'azione tagliente nel volume di uno dei due strati bituminosi a contatto e non in corrispondenza dell'interfaccia tra essi e l'inutilità dei dati registrati. Una volta posizionata la carota e vincolata tramite la vite di serraggio posteriore, è possibile portare il semi-anello superiore di taglio a contatto con lo strato anteriore del provino somministrando un leggero pre-carico: in genere non più di 0.05 kN. A questo punto il test può avere inizio ed il pistone della pressa può avanzare alla velocità prestabilita fino a portare a rottura il provino. Un particolare accorgimento di sicurezza prevede di imporre l'arresto del pistone quando tra i due supporti metallici dei semi-anelli, si raggiunge una distanza inferiore ai 2 mm. In tale modo si evita che essi possano venire pericolosamente a contatto.

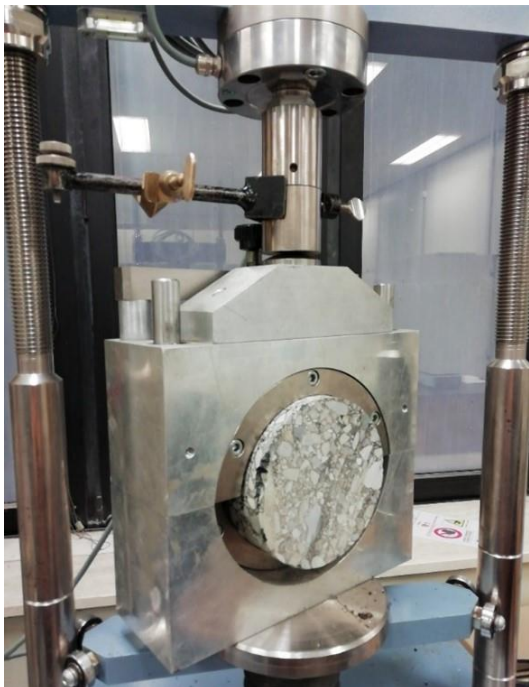


Figura 72, 73: Leutner test prima e dopo l'esecuzione della prova.

La figura mostra due fotografie scattate prima e dopo l'esecuzione di un Leutner test. In quella di destra è visibile in primo piano, la porzione anteriore di carota staccatasi dal resto

del provino sotto l'azione tagliante del semi-anello superiore. Al termine della prova è possibile azzerare il carico ed estrarre la parte posteriore della carota nella quale possono essere presenti altre interfacce già marcate da sottoporre a prova.

Durante l'esecuzione del test, la resistenza del collegamento all'interfaccia tagli strati viene registrata misurando, ad una frequenza prestabilita, il valore dello sforzo applicato dal pistone ed il corrispondente spostamento subito. La figura sottostante riporta l'andamento di una tipica curva di rottura ottenibile da un Leutner test eseguito correttamente alla temperatura di 25°C.



Figura 74: Tipico andamento di una curva di rottura da Leutner test

CAPITOLO 3: Analisi dei risultati

All'inizio della sperimentazione, vi è stata la fase di realizzazione delle miscele al variare dei principali componenti della stessa. Successivamente, queste sono state analizzate attraverso gli strumenti ed i metodi già illustrati nel capitolo 2 ed infine, i risultati ottenuti verranno riportati in questo capitolo per le singole miscele e per il confronto finale per poi esporre delle conclusioni a riguardo.

3.1 MASSE ED ALTEZZE DEI PROVINI

In questo capitolo si andranno a riportare quelle che sono le principali proprietà volumetriche delle miscele: la massa pre e post-compattazione utile a valutare il quantitativo di acqua persa durante la compattazione e la massa a 7 e a 14 giorni, utilizzando la stessa bilancia per ridurre gli errori dovuti allo strumento. Queste ultime due daranno un'indicazione importante sul quantitativo di acqua presente all'interno dei provini che verrà "consumata" per la fase di indurimento del legante cementizio. L'altra proprietà misurata sui provini mediante calibro di precisione è l'altezza, che fornirà informazioni riguardanti la compattabilità delle miscele e sarà importante nella valutazione del modulo ITSM e della resistenza a trazione indiretta. Di seguito nella tabella verranno riassunti i parametri descritti:

MISCELA	PROVINO N°	MASSA	MASSA	MASSA	MASSA	ALTEZZA (mm)
		PRE-COMPATTAZIONE	POST-COMPATTAZIONE	A 7 GG	A 14 GG	
		(g)	(g)	(g)	(g)	
	1	2400	2381,6	2374,3	2366,2	132,9
CVR_V_18.7_B	2	2400	2378,8	2370,5	2365,9	131,9
	3	2400	2374,9	2370	2364,7	132,6
	1	2400	2377,8	2372,9	2368	124,2
REF_V_22.7_B	2	2400	2379,1	2370,8	2362,7	123,9
	3	2400	2384,5	2379,4	2374,1	122,9
	1	2400	2387,1	2382,2	2374,1	124,5
CVR_V_18.7_A	2	2400	2387,9	2380,6	2375,3	124,3
	3	2400	2379,8	2374,7	2369,8	124,8
	1	2400	2378,7	2370,4	2362,3	132,5
REF_V_22.7_A	2	2400	2377,8	2372,9	2368	131,5
	3	2400	2375,4	2370,5	2365,9	132,1
	1	2400	2387,6	2379,3	2373	129,2
CVR_V_13.7_A	2	2400	2388,6	2381,3	2373,2	130,2
	3	2400	2389,1	2382,4	2377,5	130,5
	1	2400	2390,8	2385,9	2381,3	131,8
CVR_V_13.5_A	2	2400	2391,4	2384,7	2378,4	132,7
	3	2400	2387,6	2382,5	2377,2	130,5
	1	2400	2387,8	2380,5	2375,9	138,9
CVR_R_13.7_A	2	2400	2379,9	2373,2	2366,9	139,4
	3	2400	2385,5	2377,2	2372,6	139,2
	1	2400	2386,5	2379,8	2373,5	139,1
CVR_R_13.5_A	2	2400	2384,5	2377,2	2372,3	139,3
	3	2400	2388,1	2381,4	2376,1	138,8
	1	2400	2388,7	2383,8	2378	140,1
CVR_R_18.7_A	2	2400	2385,4	2377,1	2369	140,9
	3	2400	2384,1	2377,4	2371,1	139,5
	1	2400	2385,4	2380,3	2375,7	139,9
CVR_R_18.7_B	2	2400	2385,9	2379,2	2373,9	140,6
	3	2400	2386,7	2379,4	2373,6	140,9
	1	2400	2389,1	2382,4	2374,3	132,6
CVR_V_25.5_A	2	2400	2381,1	2372,8	2367	131,8
	3	2400	2387,4	2380,7	2376,1	134,1

	1	2400	2387,3	2382,4	2376,1	134,8
CVR_V_25.8_A	2	2400	2387,9	2382,8	2374,7	135,9
	3	2400	2385,8	2377,5	2372,2	134,3
	1	2400	2386,1	2379,4	2374,5	136,4
CVR_50/50_18.7.A	2	2400	2386,3	2379	2373,2	136,2
	3	2400	2384,1	2377,4	2369,3	136,8
	1	2400	2384,5	2379,6	2374,7	137,8
REF_R_22.7_A	2	2400	2387,4	2382,3	2376	137,1
	3	2400	2386,4	2379,1	2374,5	138,9
	1	2400	2388,1	2381,4	2375,6	139,4
CVR_V_30.5_A	2	2400	2384,3	2376	2367,9	138,8
	3	2400	2381,4	2374,1	2368,8	139,5
	1	2400	2384,5	2379,4	2373,1	139,7
CVR_V_30.8_A	2	2400	2379,8	2373,1	2368,2	139,6
	3	2400	2380,1	2371,8	2366,5	138,9

Figura 75: Masse ed altezze dei provini

Ad una prima analisi si può osservare che la massa post-compattazione del provino è sempre molto prossima alla massa pre-compattazione, ossia quella valutata riempiendo la fustella subito dopo la realizzazione della miscela. Questo vuol dire che il quantitativo di acqua persa durante questa fase è piccolo quindi in quasi tutte le miscele ci si è avvicinati al quantitativo “adatto” descritto al capitolo 2. Le colonne relative all’acqua persa nelle settimane successive invece, fanno capire come la miscela utilizza l’acqua al suo interno per sviluppare il fenomeno dell’indurimento. Infatti, in media, la prima e la seconda settimana generano una riduzione di massa tra i 5 e 8 grammi. Nonostante questo valore è simile per ogni impasto, è consigliabile non assumerlo come verità assoluta in quanto la procedura descritta nel programma sperimentale è una procedura del tutto aleatoria poiché la presenza d’acqua all’interno dei provini potrebbe essere fortemente influenzata dal ricoprimento degli stessi con il panno umido, il quale, può essere più o meno bagnato a seconda della sensibilità dell’operatore. L’ultima colonna riguardante l’altezza raggiunta dai provini dopo la compattazione, fornisce invece indicazioni sulla compattabilità del materiale che verrà trattata meglio nel prossimo capitolo.

MISCELA	PERCENTUALE DI MASSA	PERCENTUALE DI MASSA	PERCENTUALE DI MASSA
	PERSA POST COMPATTAZIONE	PERSA A 7 GG	PERSA A 14 GG
	%	%	%
CVR_V_18.7_B	0,90	0,29	0,54
REF_V_22.7_B	0,81	0,26	0,51
CVR_V_18.7_A	0,63	0,24	0,50
REF_V_22.7_A	0,95	0,25	0,50
CVR_V_13.7_A	0,48	0,31	0,58
CVR_V_13.5_A	0,42	0,23	0,46
CVR_R_13.7_A	0,65	0,31	0,53
CVR_R_13.5_A	0,57	0,29	0,52
CVR_R_18.7_A	0,58	0,28	0,56
CVR_R_18.7_B	0,58	0,27	0,49
CVR_V_25.5_A	0,59	0,30	0,56
CVR_V_25.8_A	0,54	0,26	0,53
CVR_50/50_18.7.A	0,60	0,29	0,55
REF_R_22.7_A	0,58	0,24	0,46
CVR_V_30.5_A	0,64	0,31	0,58
CVR_V_30.8_A	0,77	0,28	0,51

Figura 76: Percentuali di massa persa

3.2 ANALISI E CONFRONTO SULLA COMPATTABILITA'

Le caratteristiche di addensamento sono state determinate mediante l'utilizzo della pressa giratoria a taglio che permette di valutare la tendenza del materiale ad essere addensato attraverso l'analisi delle curve di compattazione desunte dai dati registrati in continuo (altezza del campione, numero di rotazioni) durante il graduale addensamento del materiale. Tali curve sono ottenute riportando in ascissa il logaritmo del numero di giri effettuati dalla pressa giratoria ed in ordinata l'altezza del provino al rispettivo giro.

La curva di compattazione che si ottiene è assimilabile ad una retta avente un'equazione del tipo:

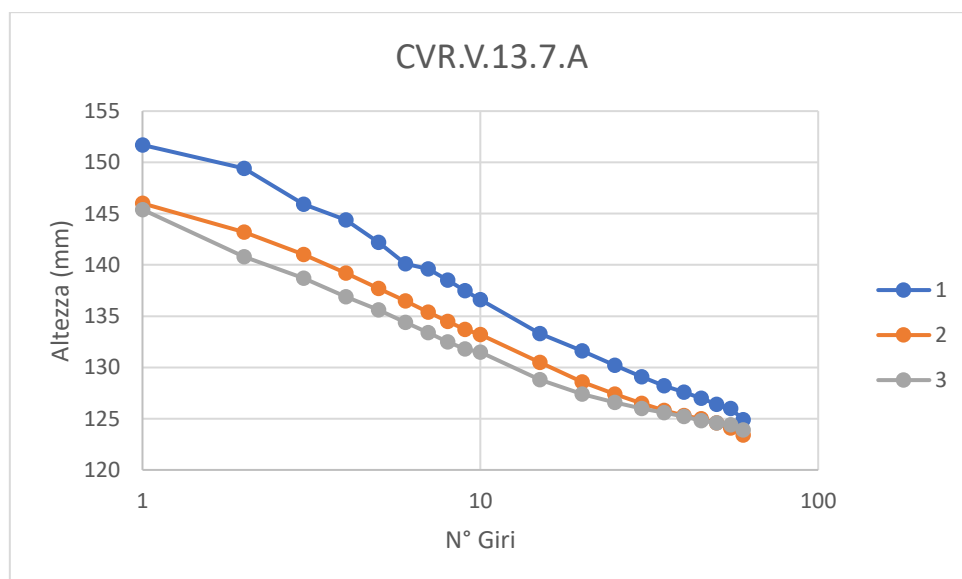
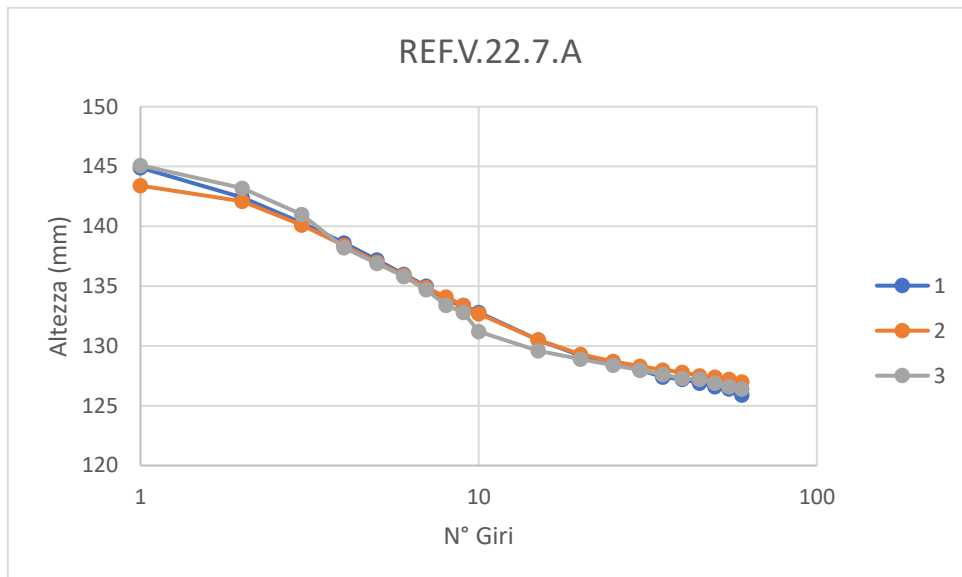
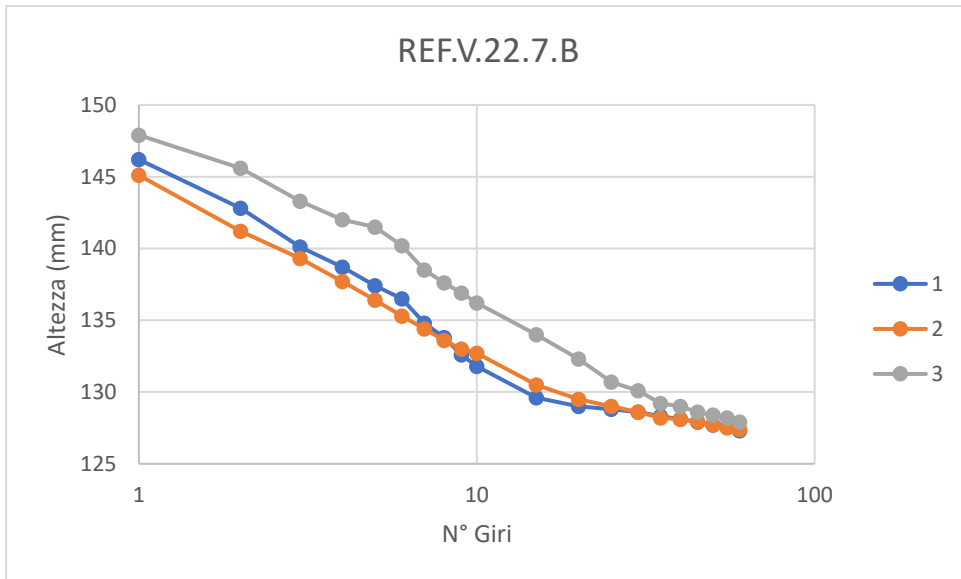
$$H = H_1 + k \cdot \log N$$

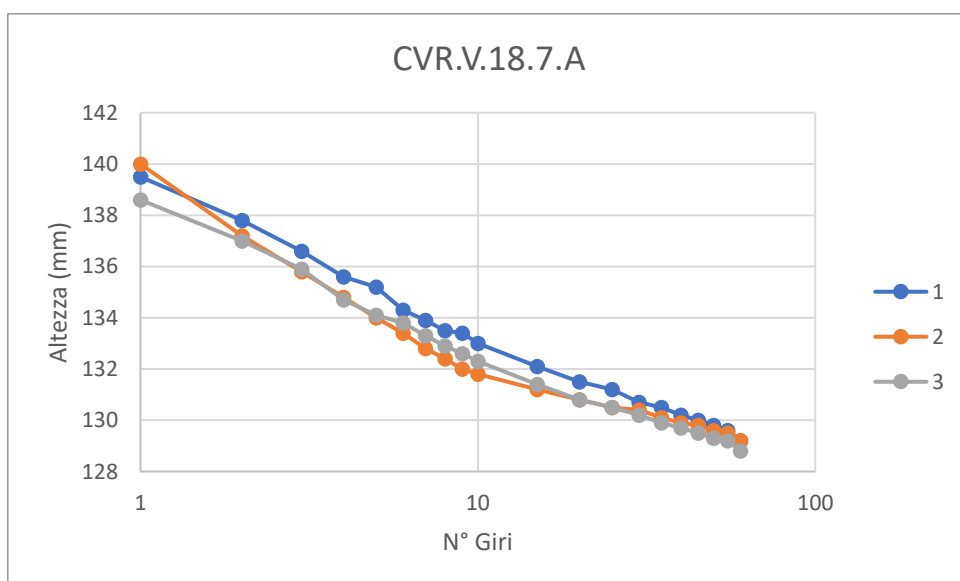
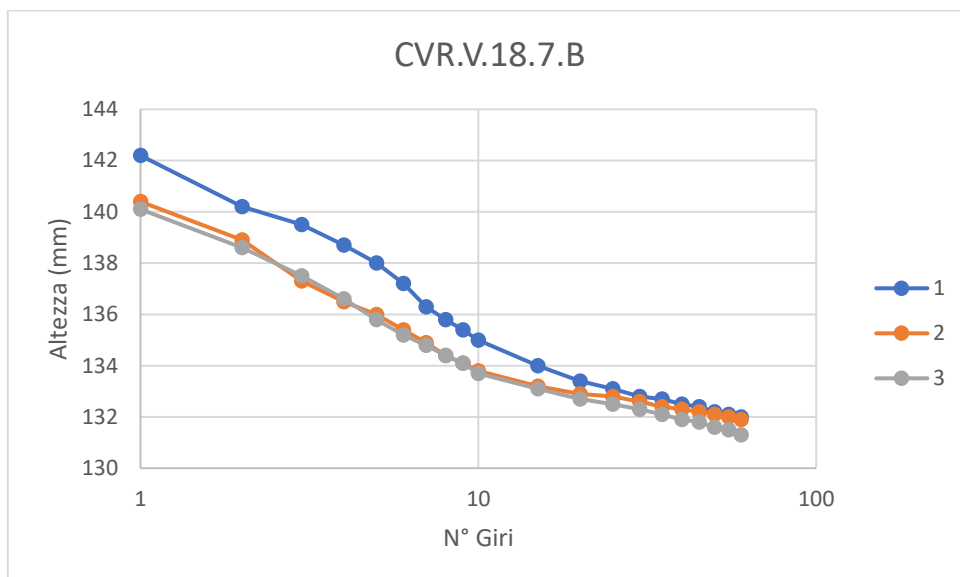
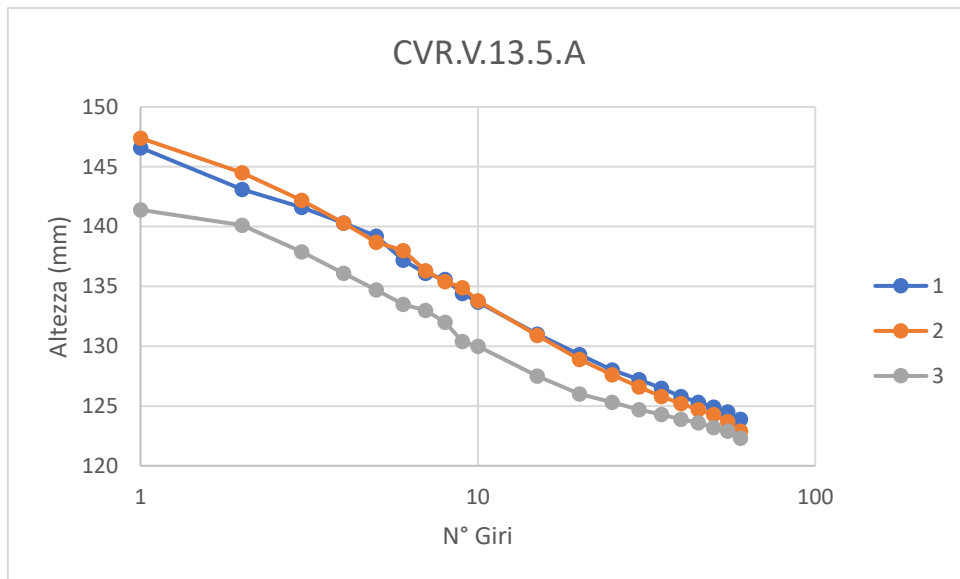
dove:

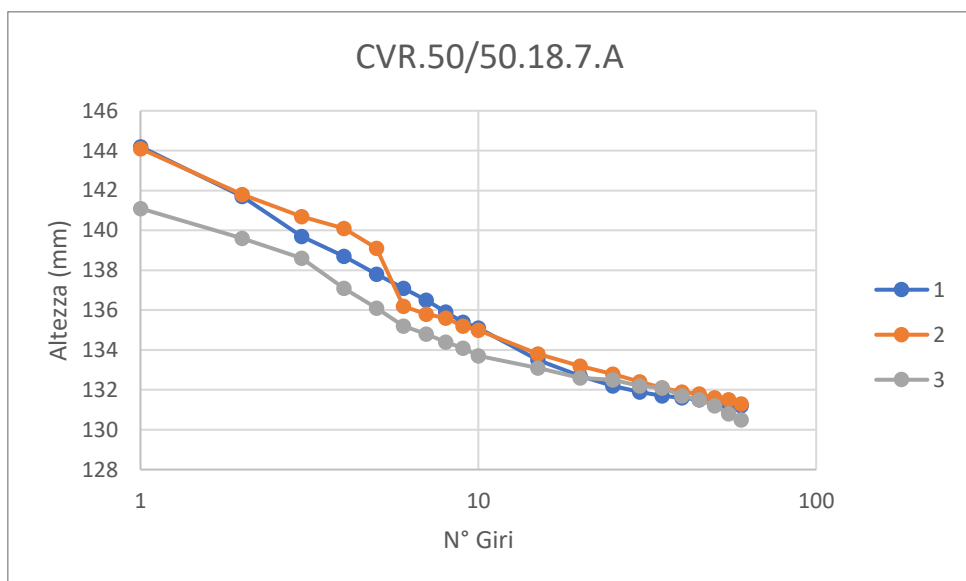
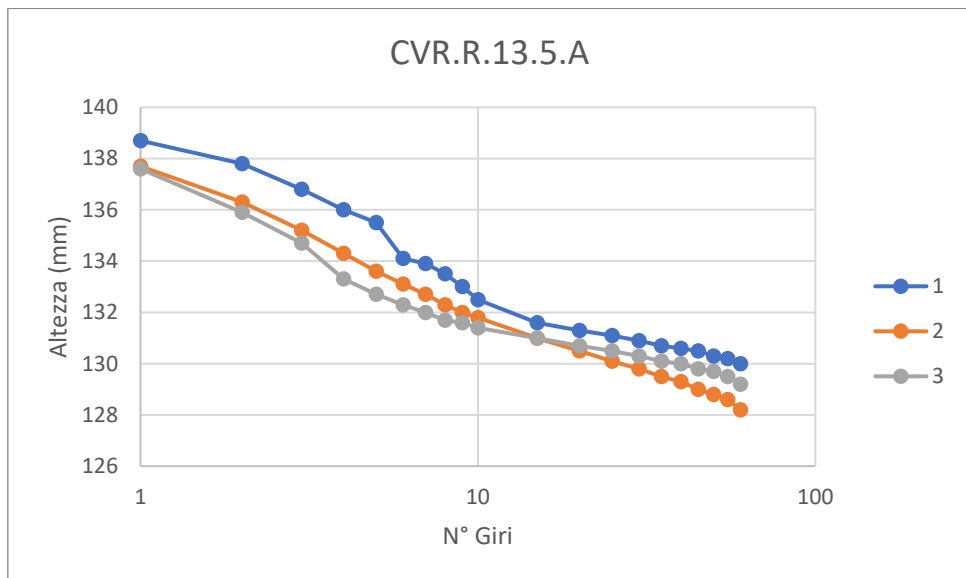
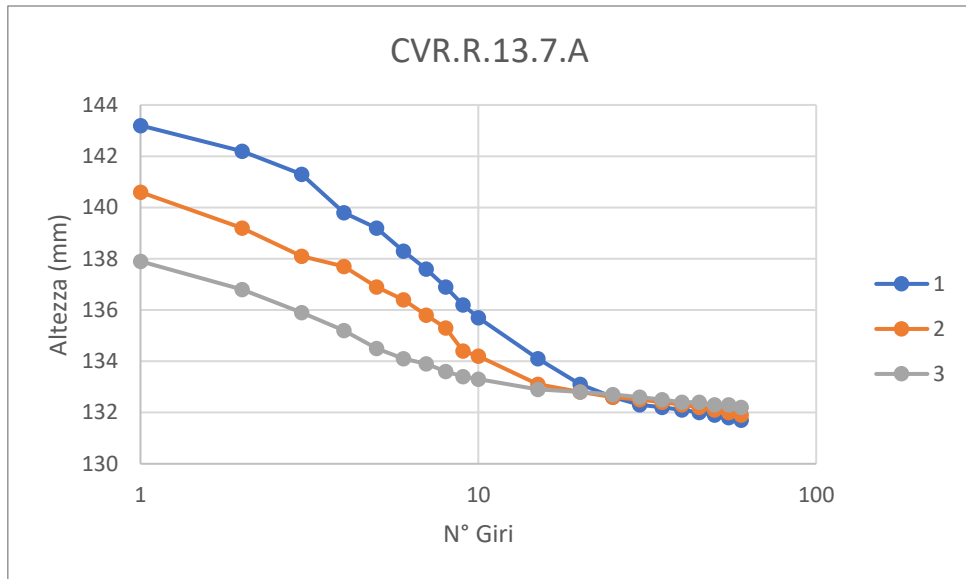
- H è l'altezza del provino;
- H_1 è l'altezza del provino dopo il primo giro;
- k è la lavorabilità della miscela;
- N è il numero di giri compiuti dalla pressa.

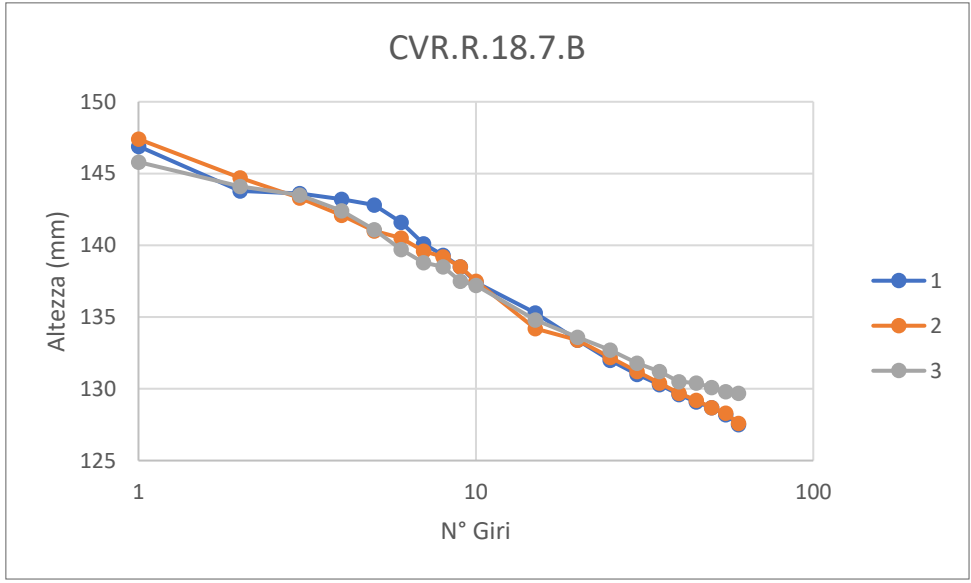
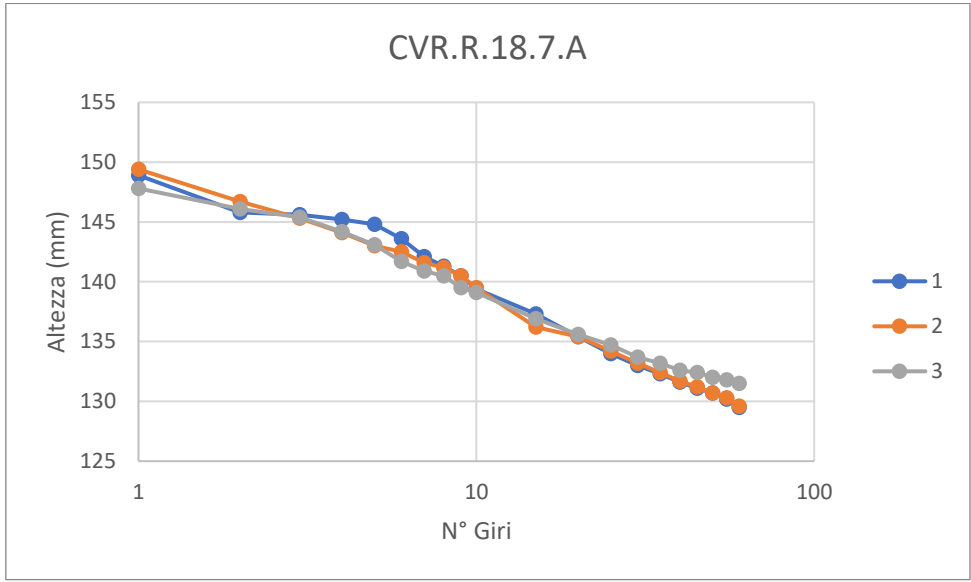
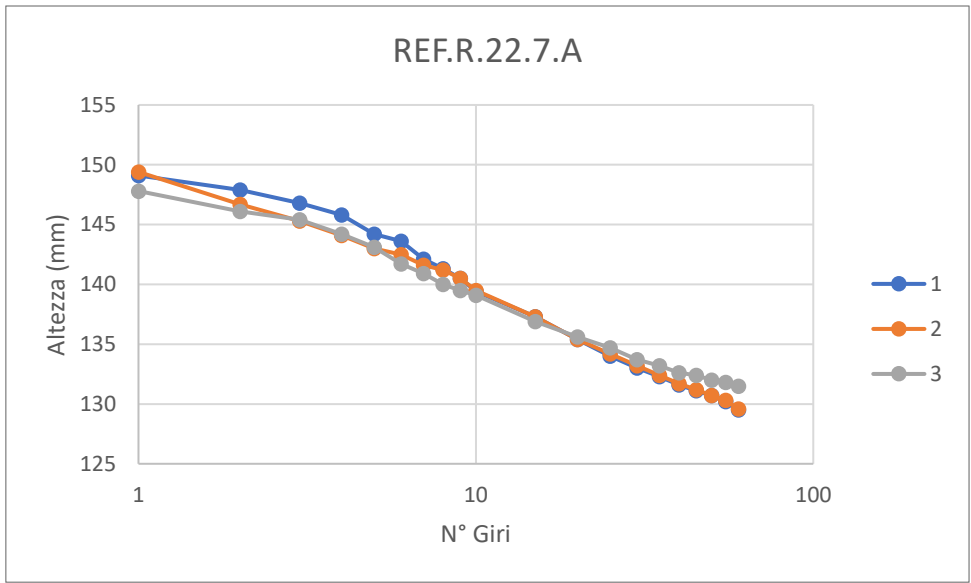
L'addensabilità è legata alle caratteristiche granulometriche degli aggregati ed è tanto maggiore quanto più la granulometria è vicina a quella del massimo addensamento, inoltre varia con il valore d'attrito interno della miscela che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati. La lavorabilità, invece, dipende dalle caratteristiche e dal contenuto di legante ed è associata alla viscosità della miscela.

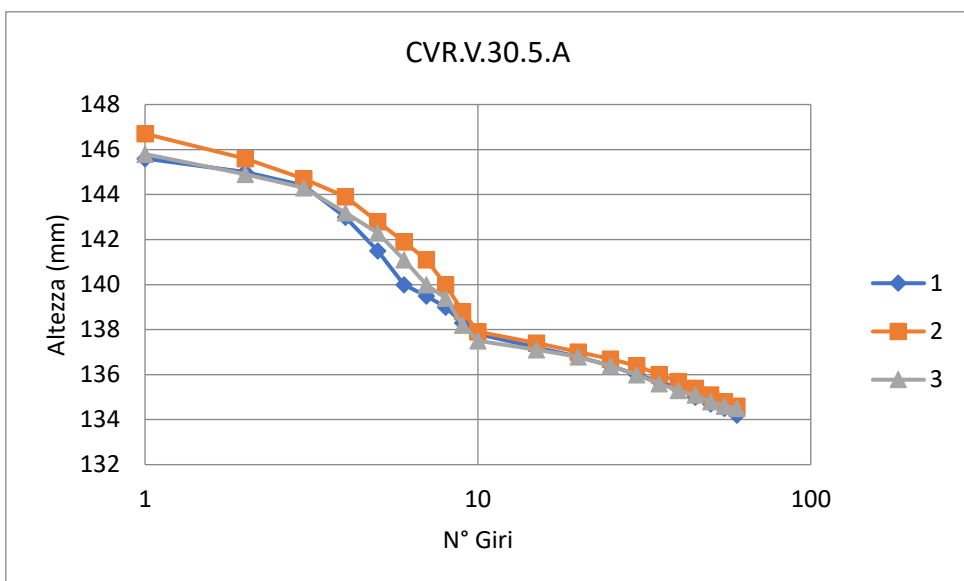
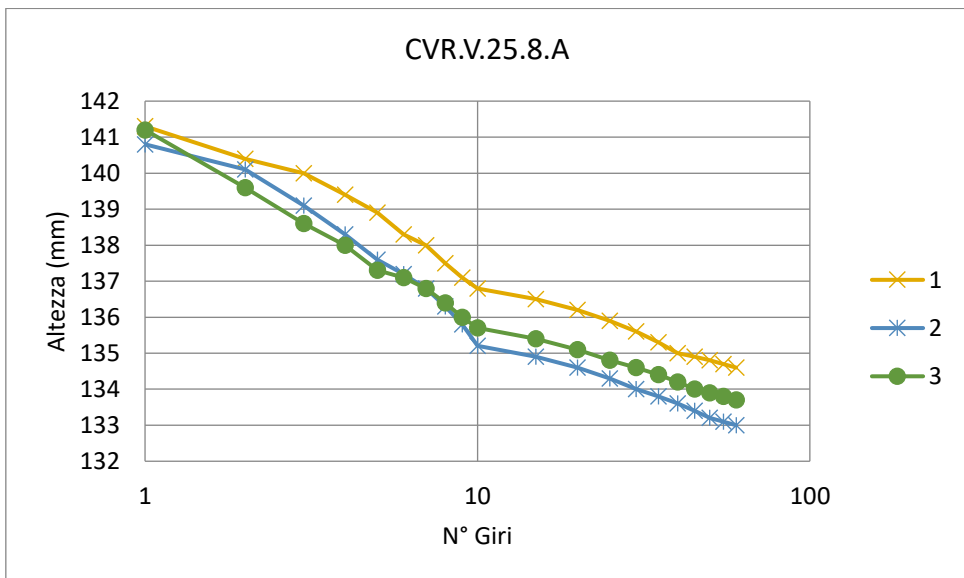
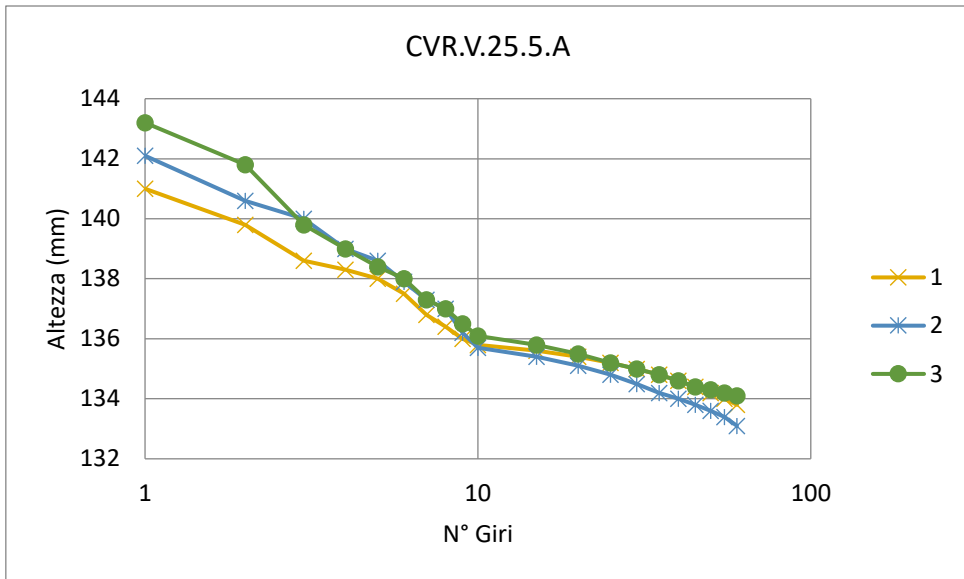
In definitiva, la procedura di prova consiste nell'eseguire la compattazione del provino andando a registrare ad tot giri, l'altezza del campione h_x . Al termine dell'addensamento si registra l'altezza finale del provino h_{min} raggiunta dopo 60 giri e la si confronta con le altezze delle altre miscele in modo da stabilire eventualmente, quale tra esse sia la migliore in termini di compattabilità e lavorabilità. Di seguito verranno riportate tali curve e verrà fornito un commento a riguardo.











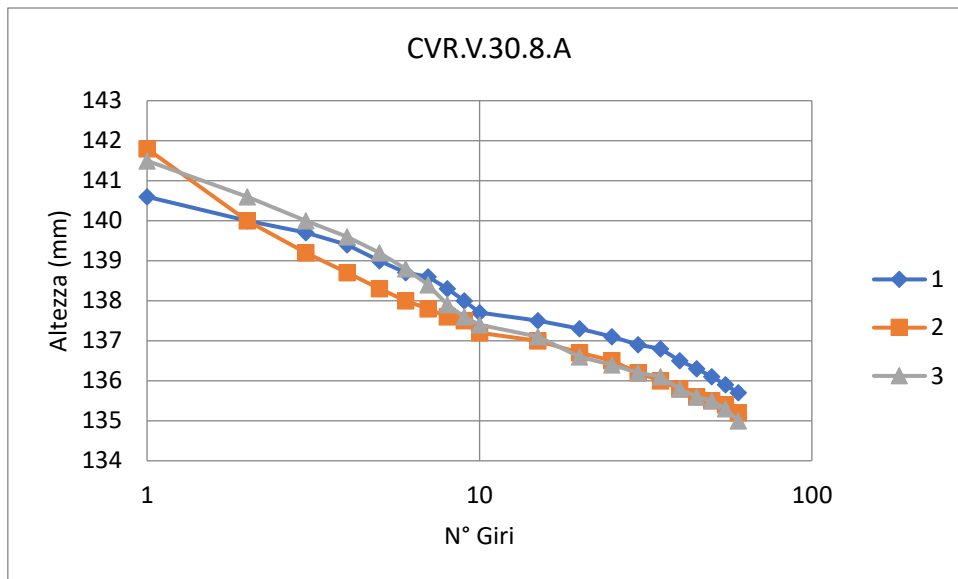


Figure 77-92: Curva di addensamento

- Dai precedenti dati, è evidente che le miscele si comportino tutte in modo analogo e che la variazione degli elementi principali che le costituiscono, non generano sostanziali differenze l'una dall'altra. Infatti, ad eccezione delle prime fasi della compattazione (primi 10 giri), in cui il comportamento è sostanzialmente dipendente dalla sensibilità dell'operatore nell'inserimento del materiale all'interno della fustella, vi è un tratto in cui il comportamento è intrinseco del materiale stesso. Tale osservazione è deducibile dalla pendenza assunta dalla retta che interpola i punti: essendo più bassa, infatti, indica la riduzione della compattabilità superati i primi 10 giri in cui è fondamentale l'incastro tra i vari aggregati di grandi dimensioni. Successivamente, superata questa fase, l'altezza finale dipende solamente dalla bontà della curva granulometrica della miscela che favorisce il massimo grado di addensamento. Si può notare infine, che i provini più alti, ossia quelli che si sono compattati meno, sono quelli caratterizzati da elevati quantitativi di filler (25% e 30%).

3.3 ANALISI DELLA PROVA DI TRAZIONE INDIRECTA E MODULI DI RIGIDEZZA (ITS E ITSM)

In questo capitolo, vengono esposti i risultati delle prove a trazione indiretta con rispettivi moduli condotte in laboratorio. Queste prove hanno comportato l'uso di due provini scelti per ogni miscela con una metodologia standard: le prove a sette giorni sono state effettuate sul provino numero 2 mentre le prove a 14 giorni sul provino numero 3. Per la valutazione dell'ITSM medio, come descritto nel capitolo del programma sperimentale, ogni provino è

stato testato sulle diagonali principali, inclinate tra loro di 90°. Per la valutazione invece dell'ITS e del CTI si sono elaborati i dati forniti dal software UTM II e di seguito si forniranno i risultati.

Miscela	Prove a 7 gg				Prove a 14 gg					
	ITSM 20°	ITS 25°	ε	CTI 25°	ITSM (MPa)			ITS 25°	ε	CTI 25°
	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	5°	20°	40°	(MPa)	%	(MPa)
CVR_V_18.7_B	23085,75	1,232	1,345	143,8	23652	21377,75	23396,25	1,4425	1,389	163,0
REF_V_22.7_B	27854	1,767	1,289	215,2	23191,5	24005,5	24264,75	1,563	1,201	204,3
CVR_V_18.7_A	25469,5	1,3435	1,321	159,7	22489,75	22502,5	24070,25	1,525	1,343	178,3
REF_V_22.7_A	26188	1,3005	1,277	159,9	22863	24363,5	24609,5	1,455	1,251	182,6
CVR_V_13.7_A	19175,5	1,035	1,401	116,0	21147	21734	21352	1,316	1,387	149,0
CVR_V_13.5_A	20627,25	0,995	1,388	112,5	22440	22001	23103	1,075	1,351	124,9

CVR_R_13.7_A	8284,75	0,6975	1,612	67,9	9747	8482	7481	0,825	1,623	79,8
CVR_R_13.5_A	10617,25	0,9	1,485	95,2	15078	12348	10815	1,11	1,501	116,1
CVR_R_18.7_A	11569,75	0,815	1,589	80,5	15001	12399	10218	1,13	1,489	119,1
CVR_R_18.7_B	9610	0,94	1,51	97,7	12869	11118	9670	1,165	1,477	123,8
CVR_V_25.5_A	26660	1,675	1,345	195,5	27134,5	28428,5	27751,5	1,93	1,362	222,5

CVR_V_25.8_A	20008,75	1,575	1,389	178,0	21364	22013	21001	1,38	1,401	154,6
CVR_50/50_18.7.A	15721,5	1,215	1,402	136,1	19352	18211,5	17568	1,09	1,313	130,3
REF_R_22.7_A	11953	0,95	1,601	93,2	15121	13673	11028	1,1	1,597	108,1
CVR_V_30.5_A	28524	1,72	1,498	180,3	28625	27171,5	26998,8	2	1,417	221,6
CVR_V_30.8_A	20492	1,43	1,579	142,2	21987,6	22301,5	22811,7	1,4	1,503	146,2

Figura 93: Risultati delle prove a 7 e 14 giorni

Dai dati presenti in tabella si evince che le miscele testate non siano termo-dipendenti, cioè che le proprie caratteristiche meccaniche non siano influenzate dalla temperatura di prova del materiale. Infatti, la variazione percentuale è circa del 5/10% per le ricette contenenti l'aggregato vergine mentre è più significativa per quelle contenente fino al 100% di fresato dove la variazione arriva a sfiorare circa il 30% tra il valore dell'ITSM ottenuto a 5° rispetto a quello a 40°. Per questo motivo i confronti tra le varie prestazioni verranno valutati solamente per i moduli a 20° C.

3.4 CONFRONTO RISULTATI ITSM E ITS

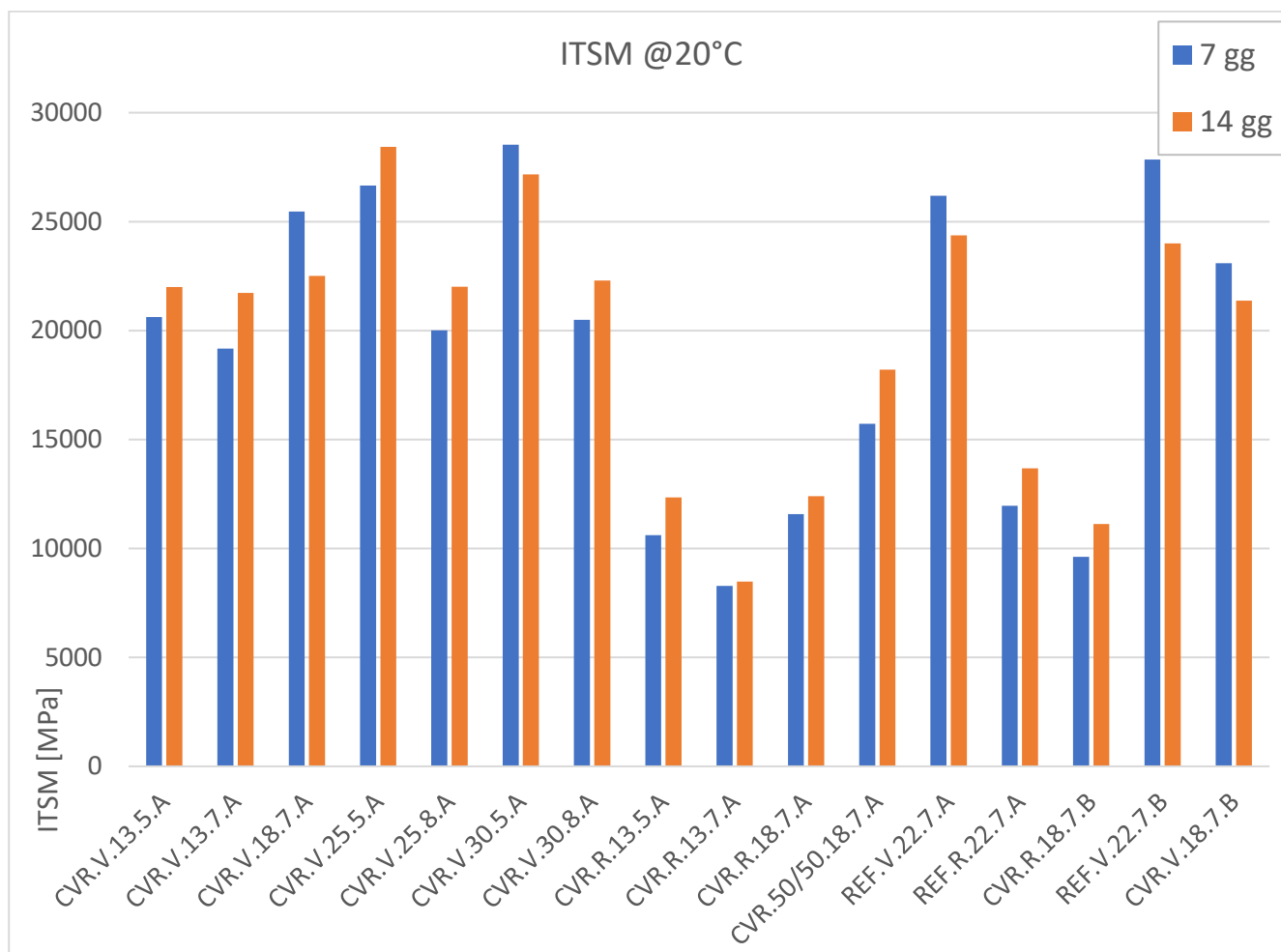


Figura 94: Risultati delle prove ITSM a 7 e 14 giorni

Come si può evincere dal grafico, appare evidente che i valori più alti sono stati ottenuti dalle miscele contenenti un quantitativo di filler (25-30%) o cemento (22%) alto mentre i valori minori sono quelli corrispondenti alla presenza di 100% RAP a discapito degli aggregati vergini. Di seguito si continuerà con la valutazione delle prestazioni delle ricette effettuate fornendo un breve commento a riguardo:

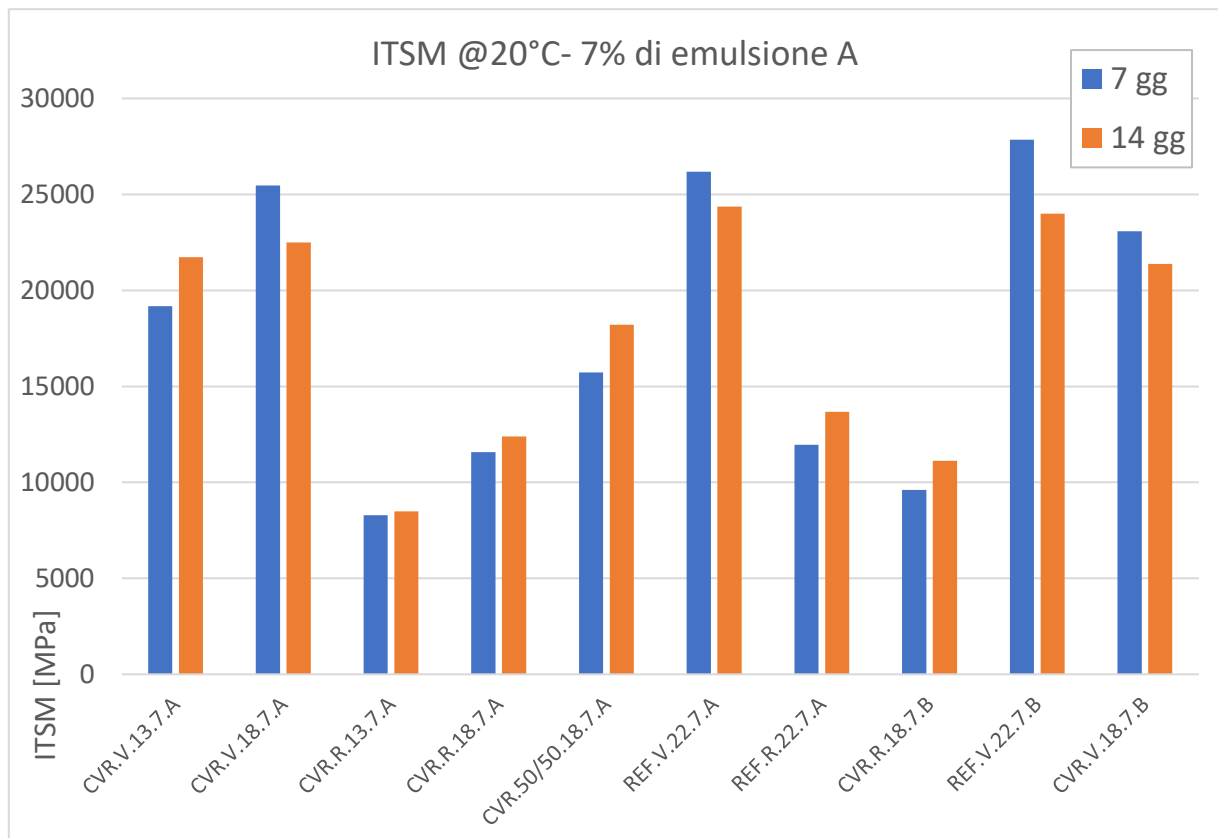
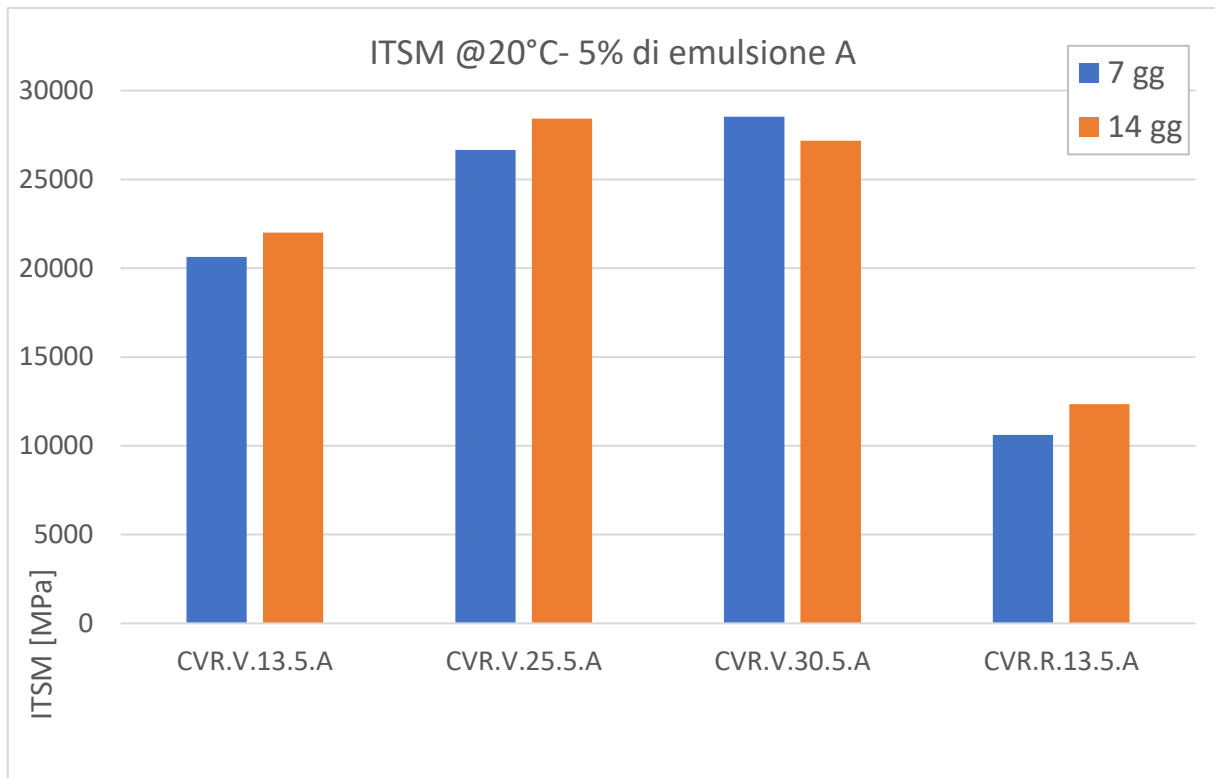


Figure 95-96: Risultati delle prove ITSM a 20°C- 5% e 7% di emulsione A

Dai precedenti due grafici si intuisce come aumentando il quantitativo di emulsione, il modulo ITSM tende a diminuire a parità delle altre componenti.

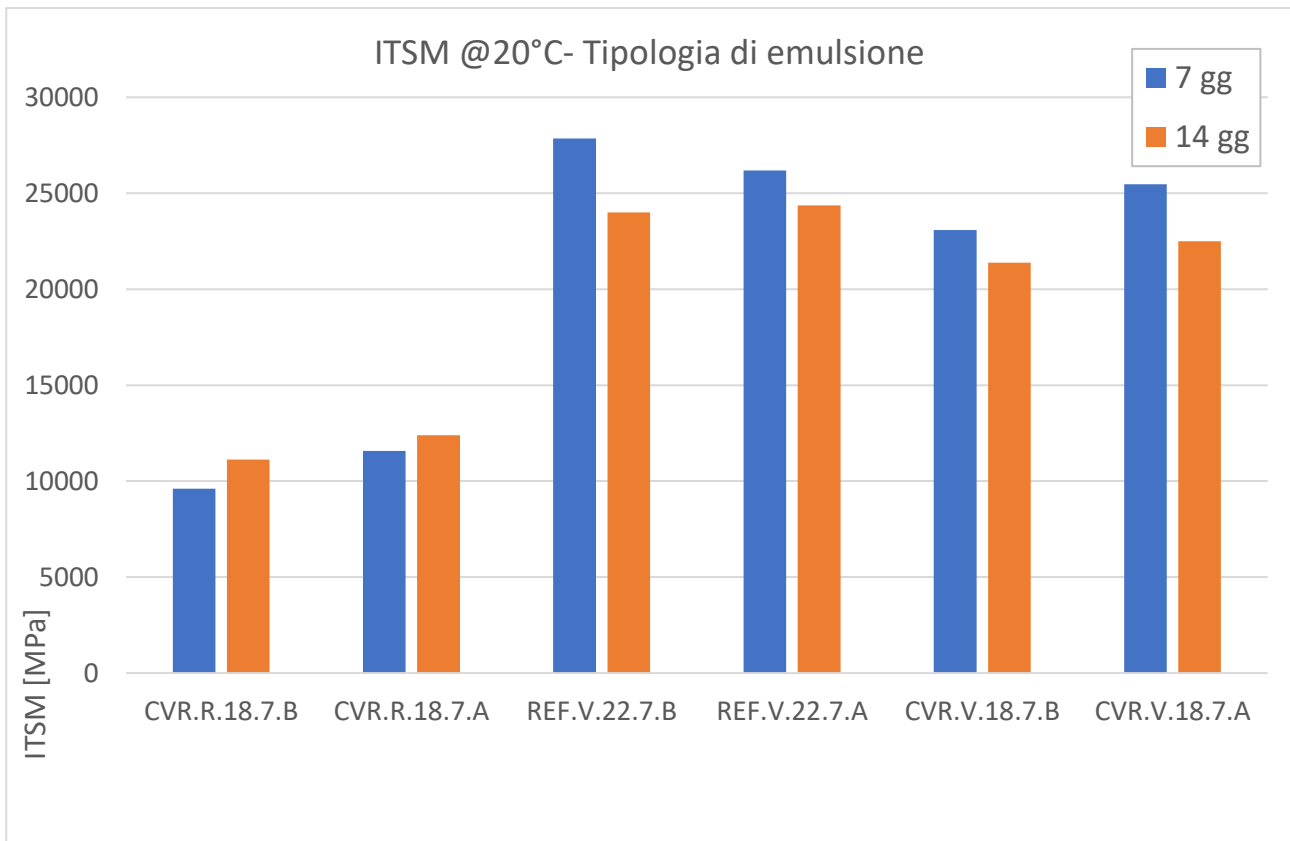


Figura 97: Risultati delle prove ITSM a 20°C-Tipologia di emulsione

In questo grafico è importante sottolineare che tra di loro le due tipologie di emulsione (A e B) presentano valori molto simili e che quindi la tipologia di emulsione non influenza le caratteristiche meccaniche del materiale.

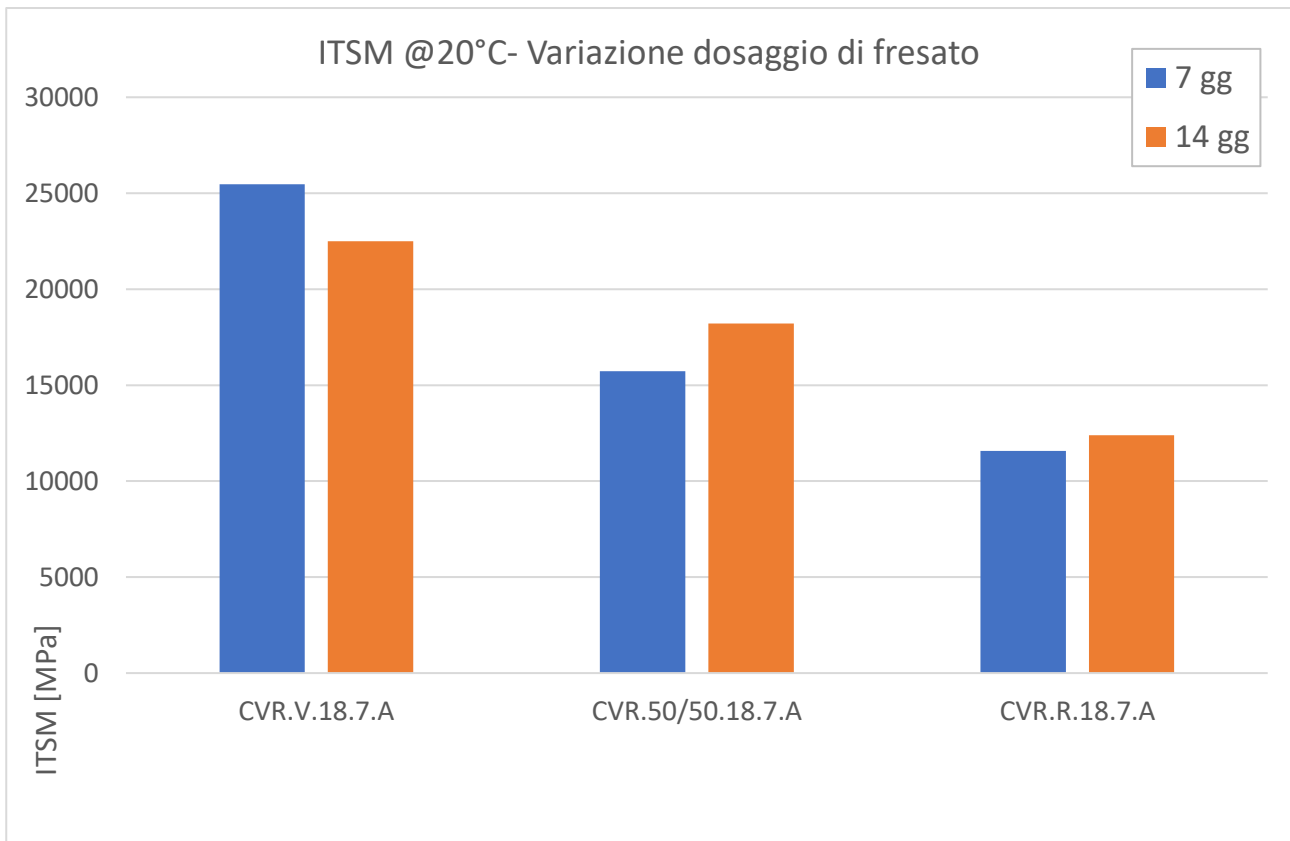


Figura 98: Risultati delle prove ITSM a 20°C-Variazione dosaggio di fresato

Di particolare importanza è stato ottenere informazioni riguardante l'aggiunta di materiale da riciclo per la valutazione del comportamento del caso studio. Infatti, come facilmente intuibile, aggiungendo materiale da riciclo il modulo cala drasticamente. Tra aggregati vergini e 100% di fresato la riduzione del modulo ITSM è stato circa del 50%.

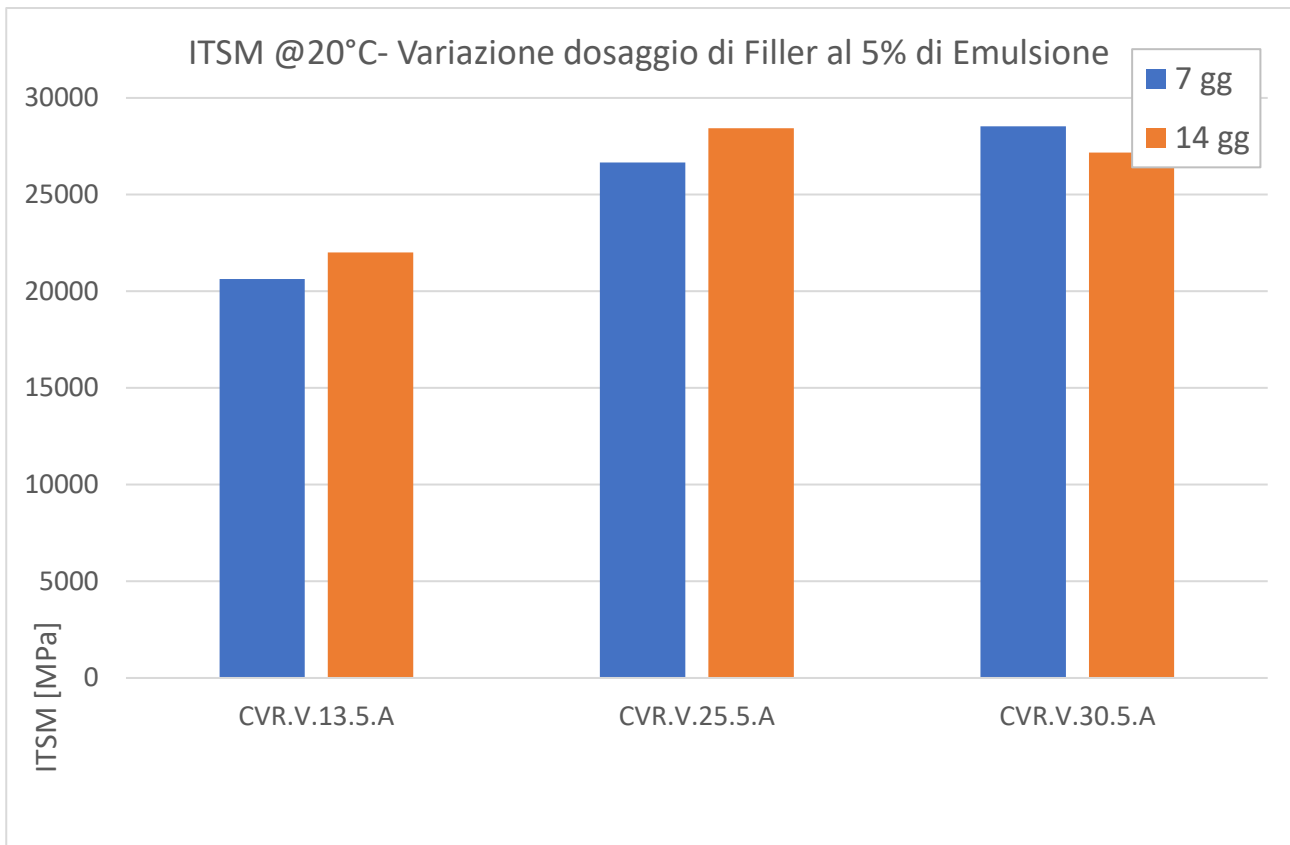


Figura 99: Risultati delle prove ITSM a 20°C-Variatione dosaggio di filler al 5% di emulsione

Infine, fissando le altre componenti della ricetta e aumentando il dosaggio di filler si nota come il modulo aumenti ma non significativamente poiché vi è una variazione di circa il 20% raddoppiando il quantitativo di legante.

Quanto osservato per i risultati del modulo ITSM verrà anche fatto di seguito per la resistenza a trazione indiretta.

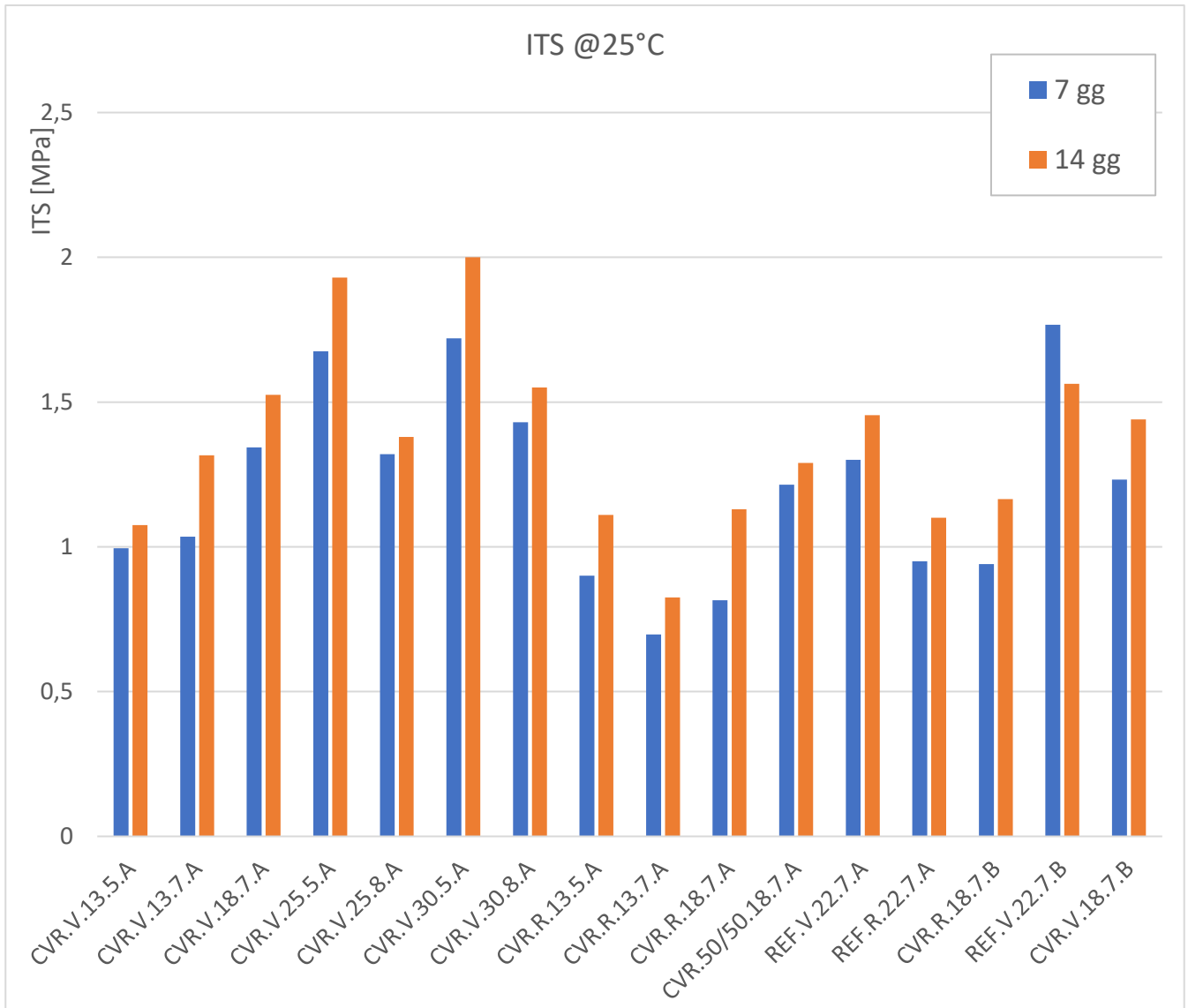


Figura 100: Risultati delle prove ITS a 25°C

Da questo grafico si nota che tra tutte le miscele testate, i valori più alti di resistenza sono stati ottenuti dalle miscele contenenti alti dosaggi di filler/cemento mentre, come per i moduli ITSM, i valori più bassi sono quelli delle ricette contenente 100% fresato.

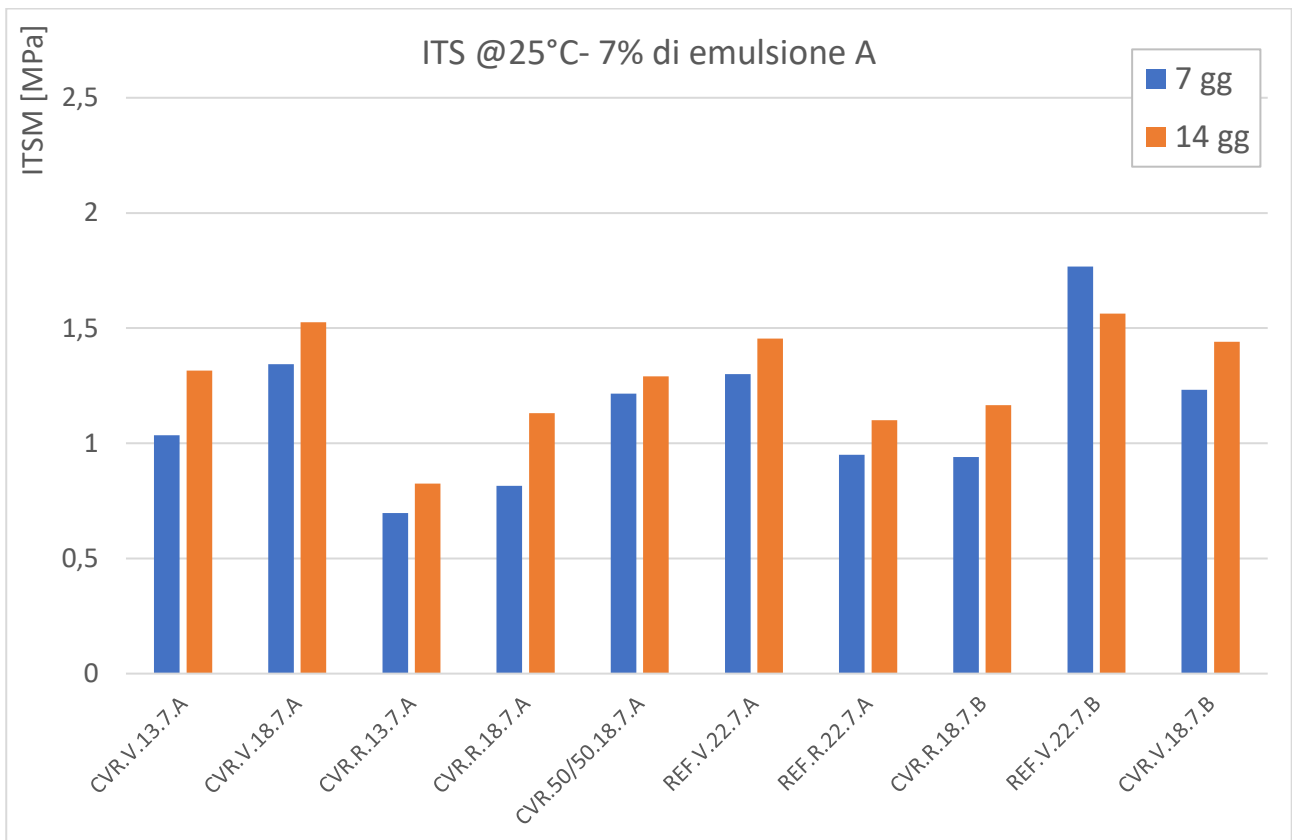
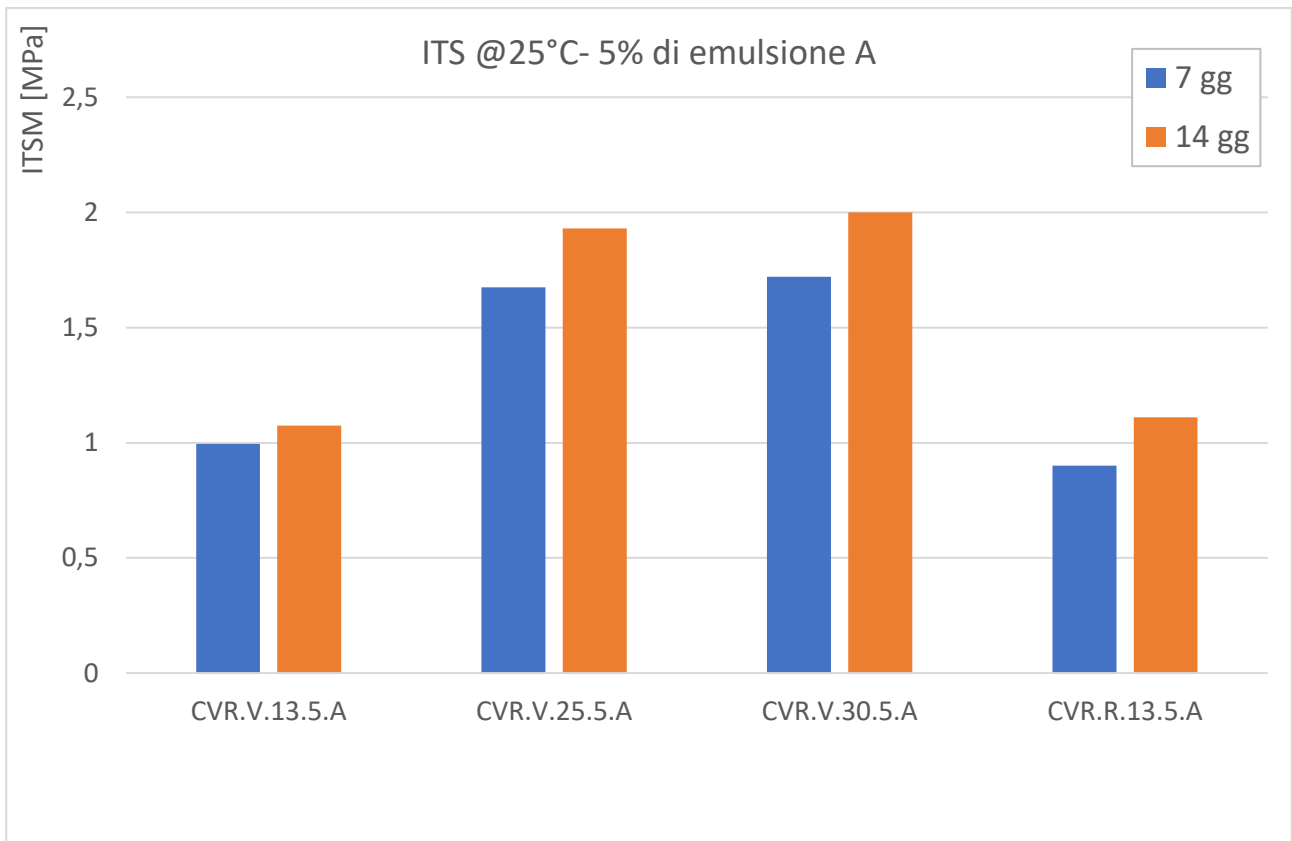


Figure 101-102: Risultati delle prove ITS a 25°C-5% e 7% di emulsione A

Dai precedenti grafici è interessante notare che a differenza dei moduli ITSM, la resistenza a trazione indiretta aumenta quasi sempre con la maturazione del cemento/filler e che quindi i valori ottenuti a 14 giorni sono maggiori rispetto a quelli ottenuti a 7 giorni.

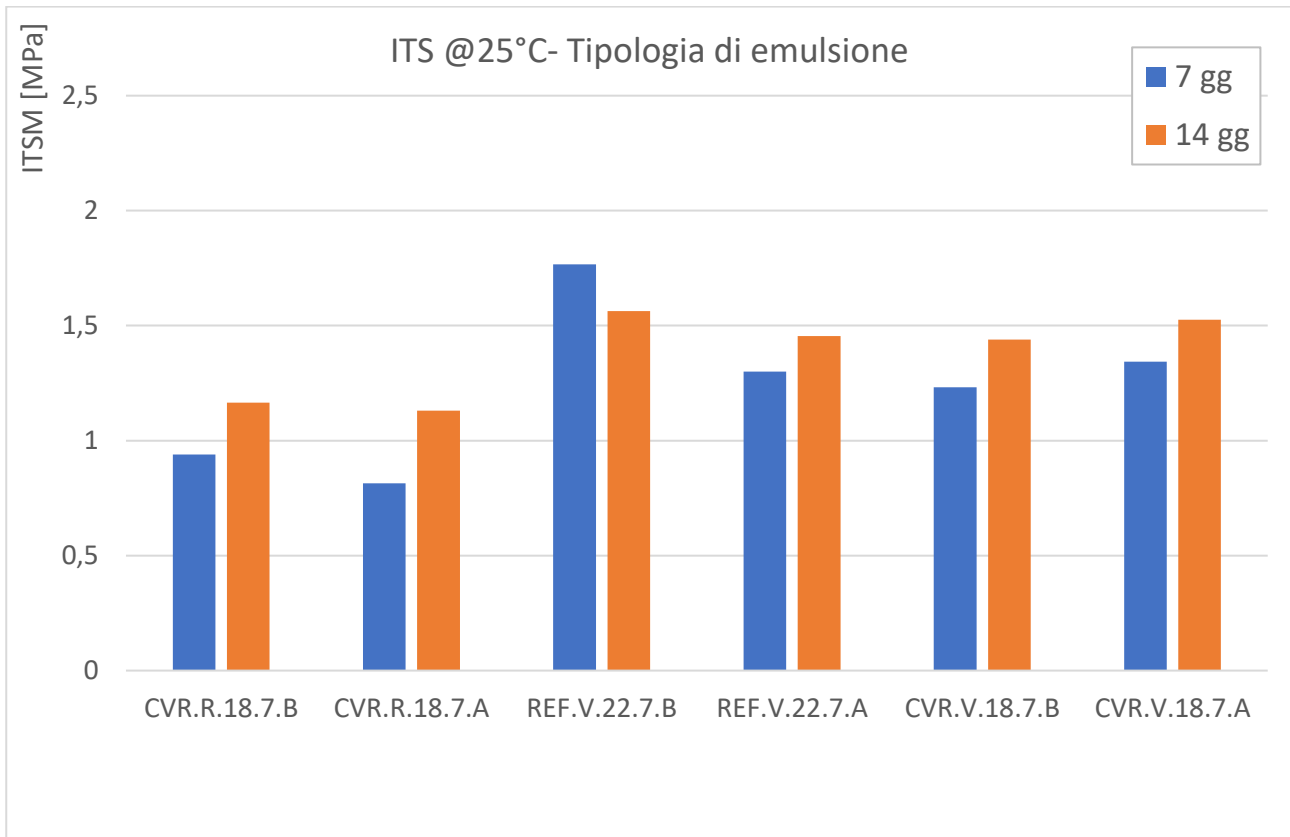


Figura 103: Risultati delle prove ITS a 25°C-Tipologia di emulsione

Anche qui, la tipologia di emulsione non ha inciso particolarmente sull'entità dei valori. Si può dunque affermare che il comportamento meccanico delle miscele non dipende da quale delle due emulsioni è stata usata.

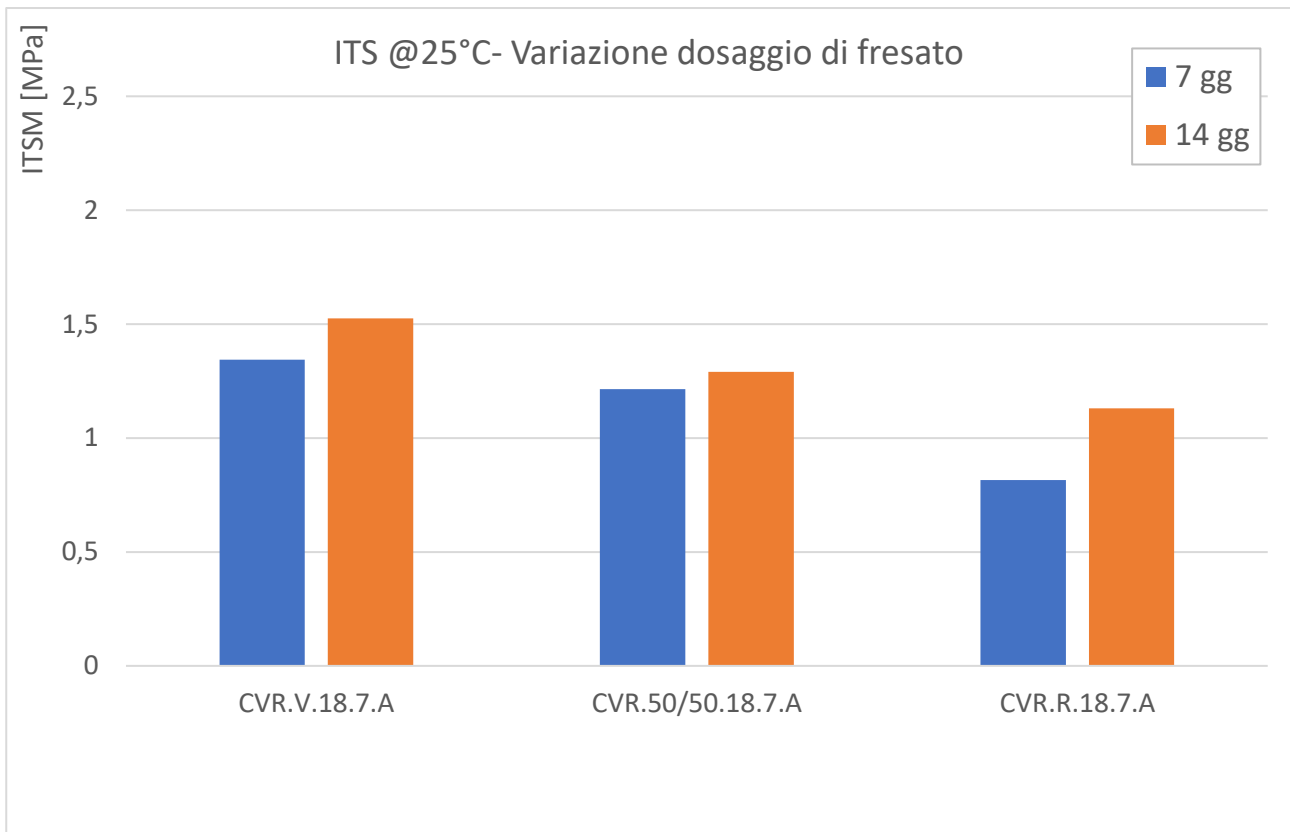


Figura 104: Risultati delle prove ITS a 25°C-Variazione dosaggio di fresato

Così come osservato per il modulo ITSM, anche per l'ITS si può notare come aumentando il dosaggio di fresato vi è una riduzione della resistenza, anche se in termini assoluti, questa riduzione è inferiore. Si è passato infatti da un valor medio di circa 1,4 MPa per aggregati vergini a circa 1 MPa per 100% di fresato, riportando quindi un'incidenza di circa il 30%.

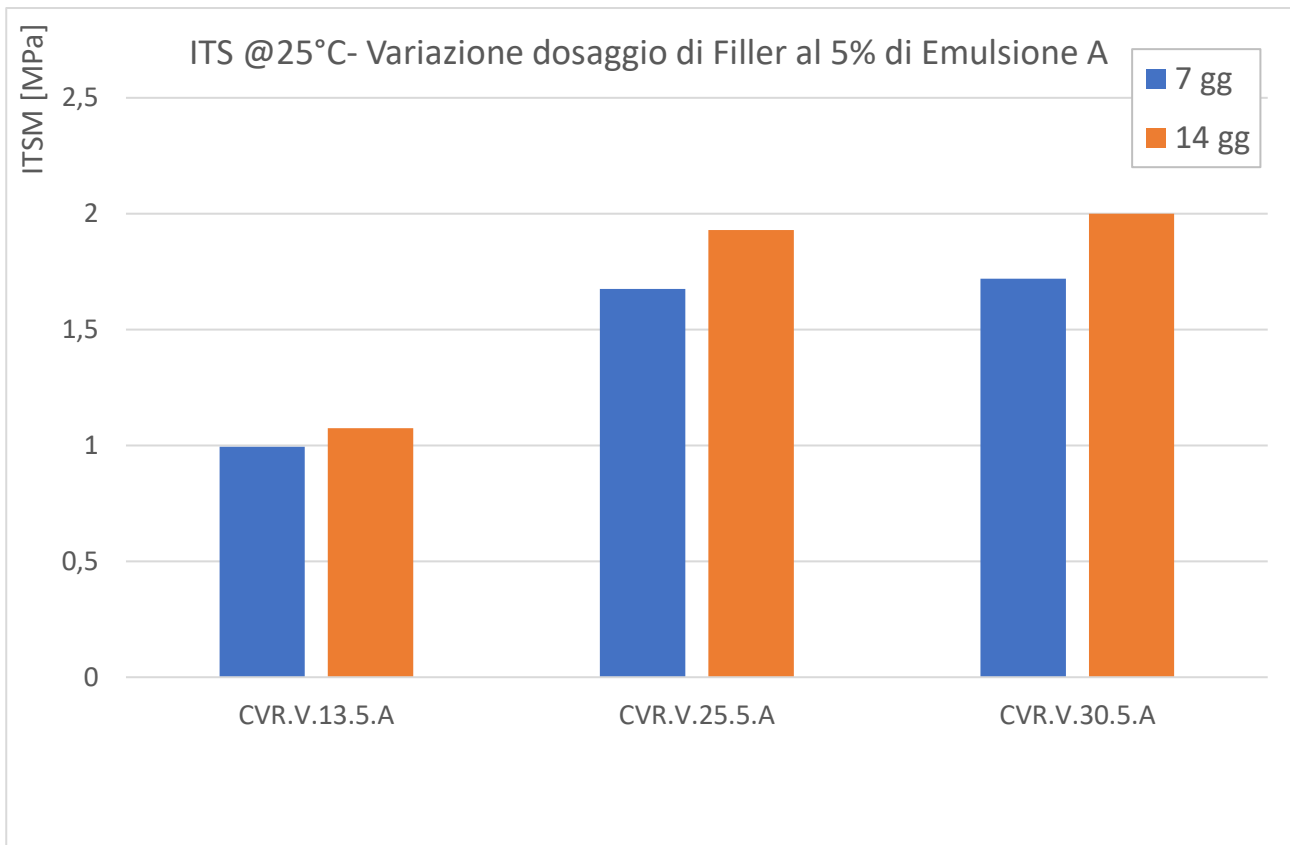


Figura 105: Risultati delle prove ITS a 25°C-Variatione dosaggio di filler al 5% di emulsione A

Infine, si è notato come raddoppiando il quantitativo di filler, è praticamente raddoppiato anche il valore della resistenza a trazione indiretta. Un altro aspetto fondamentale dal grafico precedente è che passando dal 25 al 30% di dosaggio non vi sono miglioramenti significativi.

3.5 ANALISI E CONFRONTO PROVA LEUTNER

Ultimi, ma non meno importanti, sono i risultati ottenuti dalle prove Leutner sulle 3 lastre di materiale miscelate utilizzando la ricetta CVR.V.25.5.A. Si ricorda che sull'interfaccia della prima lastra di 30x30 cm vi era presente la rete in fibra di vetro solo su metà di essa, quindi di dimensioni 15x30 cm (No rete + Rete 1). La seconda lastra (Rete 1 + Rete 2) è stata realizzando variando solamente la tipologia di rete in termini di dimensioni delle maglie quadrate della stessa. Invece l'ultima lastra (No rete* + Rete 1*) è stata realizzata come la prima, ma nebulizzando l'interfaccia tra il primo e il secondo strato prima della compattazione.

LEGENDA	MATERIALE	DIMENSIONI MAGLIA	DIMENSIONI RETE
RETE 1	Fibra di vetro	3x3 cm	15x30cm
RETE 2	Fibra di vetro	2x2 cm	15x30cm
RETE 3	Fibra di vetro	2,5x2,5 cm	15x30cm
RETE 1*	Fibra di vetro	3x3 cm	15x30cm

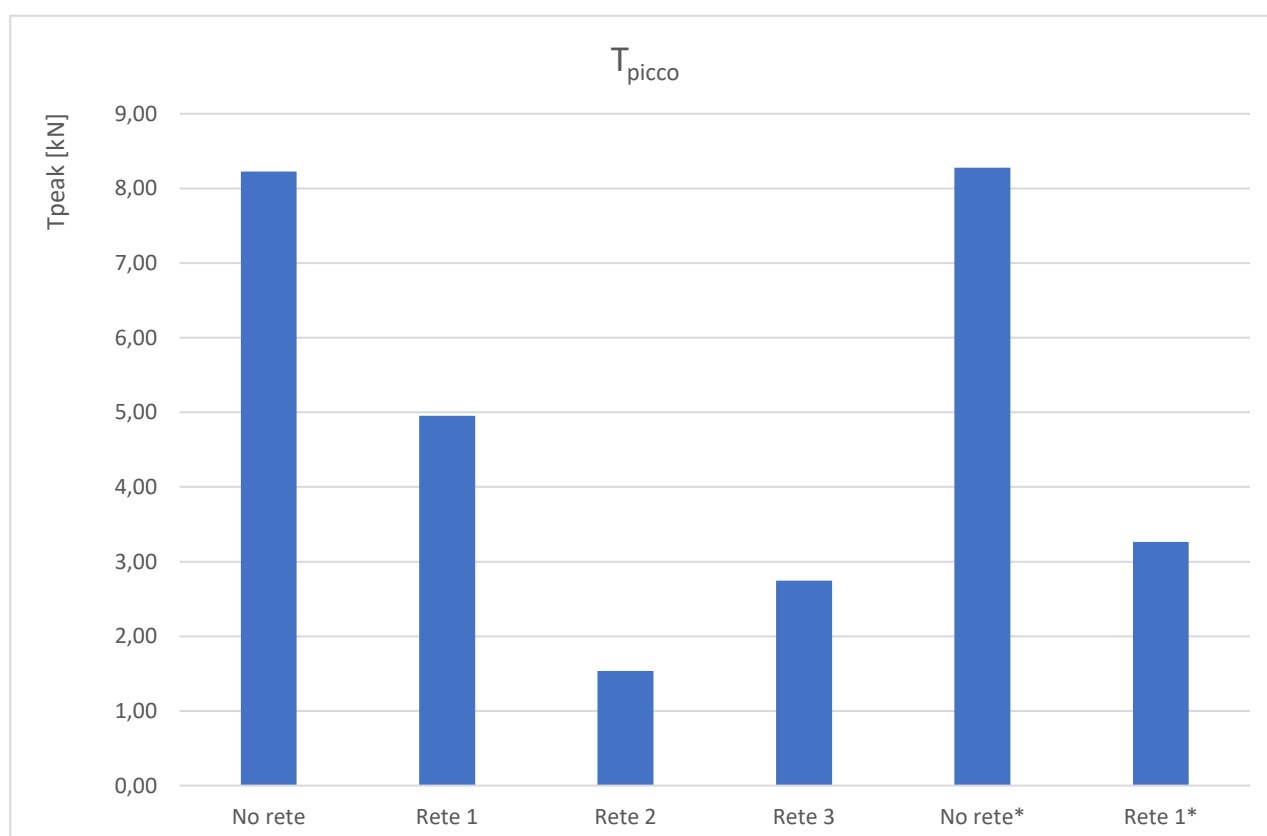


Figure 106 e 107: Legenda e Risultati Prova Leutner

Si nota come i valori di resistenza più alti sono quelli dove vi è assenza di rete, e che nebulizzare gli strati prima della compattazione non porta benefici. Inoltre, le resistenze ottenute variando la tipologia della rete sono significativamente diverse per cui incidono anche le caratteristiche della rete stessa.

CONCLUSIONI

La presente sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Strade del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura”, è stata realizzata con l’obiettivo di confrontare le caratteristiche meccaniche e prestazionali di differenti tipologie di conglomerato bituminoso, ottenute variando la composizione granulometrica degli aggregati, il dosaggio e la tipologia del legante cementizio, il dosaggio e la tipologia di emulsione bituminosa e l’utilizzo parziale o totale nonché l’assenza di materiale riciclato (RAP). Nella fattispecie la tesi tratta lo studio di un particolare conglomerato bituminoso realizzato a freddo che, al variare dei suddetti materiali, consente la contemporanea diminuzione dello spessore dello strato necessario grazie alla presenza di un elevato quantitativo di filler attivo o cemento mantenendo in parte le proprietà visco-elastiche del bitume dovute alla presenza di emulsione bituminosa.

In questo capitolo verranno formulate le riflessioni conclusive a cui si è giunto in fase di analisi dei dati ottenuti in merito ai parametri di confronto introdotti al capitolo 2. Nella fattispecie:

1. la compattabilità
 2. il modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) a 7 e 14 giorni;
 3. la resistenza a trazione indiretta (ITS) a 7 e 14 giorni;
 4. la resistenza al taglio all’interfaccia
- Per quanto riguarda la compattabilità, le miscele si comportano tutte in modo analogo con parametri simili tra loro
 - Le miscele realizzate con aggregati vergini non sono termo-dipendenti in termini di ITSM, ossia il valore del modulo non è influenzato dalla temperatura di prova. Quelle invece con

alti quantitativi di fresato manifestano un comportamento più simile ai conglomerati bituminosi tradizionali in cui le prestazioni sono influenzate dalla temperatura.

- Aumentando il dosaggio di emulsione bituminosa, il modulo ITSM diminuisce
- Il comportamento meccanico in termini di modulo e resistenza a trazione è indipendente dalla tipologia di emulsione utilizzata
- Aumentando il dosaggio di fresato i parametri diminuiscono, fino a dimezzarsi nel caso in cui vi sia 100% RAP per l'ITSM e una riduzione più contenuta fino al 30% per quanto riguarda l'ITS
- Aumentando il quantitativo di filler aumentano sia ITSM che ITS, seppur sia più accentuato nel caso della resistenza a trazione indiretta in cui l'aumento è direttamente proporzionale all'aumento del dosaggio. Il comportamento meccanico però, sembra raggiungere il picco per entrambi i parametri al 25% di filler poiché aumentando ulteriormente al 30% non vi sono significative differenze
- Aumentando il dosaggio di emulsione bituminosa, l'ITS aumenta
- La resistenza a trazione indiretta manifesta valori più alti a 14 giorni rispetto a quelli a 7 giorni, a differenza dei moduli ITSM che hanno un comportamento più vario ed imprevedibile
- Per quanto riguarda invece la resistenza a taglio all'interfaccia, si può notare che i valori di resistenza più alti sono quelli dove vi è assenza di rete, e che nebulizzare gli strati prima della compattazione non porta benefici. Inoltre, le resistenze ottenute variando la tipologia della rete (dimensioni delle maglie quadrate) sono significativamente diverse per cui incidono anche le caratteristiche della rete stessa

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Felice A. Santagata, “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali”, Pearson. Vol. 1 e 2;
- Archivio Dati - Laboratorio di Strade UNIVPM
- UNI EN 12697-26 - Rigidezza - 2012;
- UNI EN 12697-23 - Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi - 2006;
- ANAS – Capitolato speciale di appalto – norme tecniche per l'esecuzione del contratto - parte 2;
- Le pavimentazioni stradali: flessibili e semirigide (ingenio-web.it);
- Cos'è il Bitume e come viene utilizzato - Geoconsulting Italia;
- Bitume - Attrezzatura per Edilizia - Caratteristiche bitume (casapratica.org);
- Bitume - Materiali per Edilizia <https://www.rifaidate.it/materiali-edili/materiali-per-edilizia/bitume.asp#ixzz739GJfcuV>;
- Orientarsi fra impianto continuo e discontinuo | Marini (fayat.com);
- Gli impianti d'asfalto – SITEB;
- https://www.stradeanas.it/sites/default/files/pdf/1.3.3/Quaderni_tecnici_volume_5.PDF;