

Sommario

1.INTRODUZIONE	2
2.INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	4
3.MATERIALI E MACCHINARI	9
3.1 MATERIALI	9
3.1.1 AGGREGATI.....	9
3.1.2 FRESATO STRADALE	17
3.1.3 BITUME.....	20
3.1.4 ADDITIVI	21
3.2 MACCHINARI	22
3.2.1 MISCELATRICE	22
3.2.2 PRESSA GIRATORIA	28
3.2.3 PRESSA MECCANICA UNIVERSALE	30
4.PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	33
4.1 PREPARAZIONE MISCELE.....	33
4.2 FUSI GRANULOMETRICI DELLE MISCELE.....	40
5.RISULTATI DELLE PROVE	42
5.1 GRADO DI ADDENSAMENTO	43
5.2 TRAZIONE INDIRECTA	54
5.3 RIEPILOGO.....	60
6. CONCLUSIONI.....	63

1.INTRODUZIONE

Il recente e sempre più frequente interesse rivolto alla tutela ambientale e alla salvaguardia dei beni a nostra disposizione, ha portato a ricercare innovazioni e sperimentazioni in tutti i campi; nell'ambito dell'ingegneria civile si è tentato di riprodurre le prestazioni meccaniche riscontrate nelle buone pavimentazioni stradale utilizzando nuove tecnologie che andassero a diminuire le emissioni e a favorire un minore sfruttamento di materie prime.

In questa tesi, lo scopo dello studio condotto sullo strato di usura della pavimentazione, realizzato con tecnologie tiepide (Warm Mix Asphalt), è infatti quello di confrontare le diverse proprietà meccaniche e volumetriche di miscele di conglomerato bituminoso al variare di alcune componenti inserite nella miscela quali percentuali di fresato, quantitativo di bitume e tipologia di additivo chimico aggiunto.

L'analisi sperimentale è stata richiesta da un impianto di produzione con proprie miscele al fine di ottimizzarle; il lavoro eseguito è stato strutturato nei seguenti capitoli:

- ❖ CAPITOLO 2 - INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA: vi si descrive il ciclo dell'economia circolare, il riciclaggio nell'ambito di pavimentazioni stradali e le tecniche di riutilizzo di fresato con metodologie tiepide.

- ❖ CAPITOLO 3 – MATERIALI E MACCHINARI: espone la totalità di materiali (aggregati, bitume, additivi) utilizzati spiegandone le prove di caratterizzazione, inoltre elenca i diversi macchinari (miscelatrice, pressa giratoria e macchina per la trazione indiretta) con le rispettive funzioni.

- ❖ CAPITOLO 4 – PROGRAMMA SPERIMENTALE: mette in evidenza il procedimento seguito per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso, le modalità di compattazione e le successive prove sui campioni, volte ad analizzarne il grado di addensamento e il coefficiente di resistenza a trazione indiretta.

- ❖ CAPITOLO 5 – RISULTATI DELLE PROVE: mette in evidenza i risultati acquisiti in relazione agli obiettivi prefissati all’inizio della sperimentazione.

- ❖ CAPITOLO 6 – CONCLUSIONI: commenta le variazioni di proprietà meccaniche e volumetriche dei diversi provini e motiva le scelte di determinati provini rispetto ad altri.

2.INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

2.1 ECONOMIA CIRCOLARE

A discapito di un completo utilizzo di materie prime, per garantire una maggiore sostenibilità ambientale entra in gioco l'economia circolare, ossia un modello di produzione e consumo (Fig.2.1)), caratterizzato da diverse fasi quali: condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo, in questo modo si rende possibile un'estensione del ciclo di vita dei materiali utilizzati e, di fatto, una riduzione notevole di rifiuti prodotti.

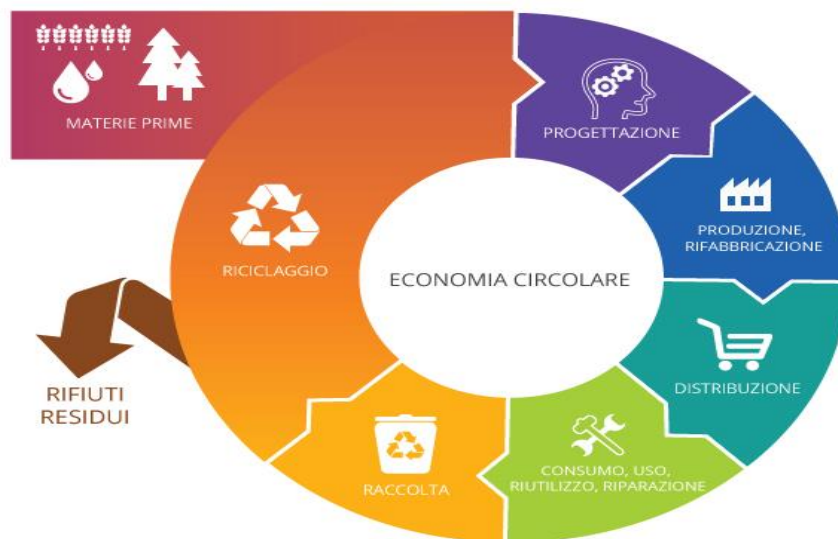


Figura 2.1: Ciclo dell'economia circolare

I suoi principi vanno però a contrastare il modello economico tradizionale, caratterizzato dallo schema "estrarre, produrre, riutilizzare e gettare" il quale sfrutta la disponibilità di elevati quantitativi di materiali ed energia facilmente reperibili e a basso prezzo.

La transizione verso un'economia circolare è una scelta ampiamente promossa dal Parlamento Europeo ed è dettata dal simultaneo aumento della domanda di materie prime e da una scarsità di risorse disponibili, questa decisione porta notevoli vantaggi sotto il punto di vista ambientale e lavorativo, permettendo infatti un notevole incremento dell'occupazione (fino a 580'000 nuovi posti di lavoro in tutta Europa).

Il punto focale è dunque la capacità di trovare il giusto equilibrio che consenta di continuare sulla strada del progresso, ma senza danneggiare irrimediabilmente l'ambiente dal quale la nostra stessa sopravvivenza dipende.

2.2 RICICLAGGIO STRADALE

Una delle tematiche più affrontate ai giorni nostri è di certo lo smaltimento dei rifiuti, il mondo stradale è uno dei pochi che permetta un completo riutilizzo dei materiali impiegati; l'argomento è stato trattato soprattutto in seguito al notevole incremento della popolazione e, di conseguenza, del traffico e dei carichi agenti sulla pavimentazione; ma fortunatamente negli ultimi anni si è sempre più spesso cercata una soluzione che andasse ad impattare il meno possibile sull'ambiente, andando a sfruttare quantitativi più ingenti di materiale riciclato.

Di fatto, il materiale proveniente dal rifacimento delle pavimentazioni stradali esistenti, chiamato comunemente RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o fresato stradale, può avere nuova vita grazie a diverse tecniche di riciclaggio: la prima e più utilizzata, è certamente quella "a caldo" la quale permette un riutilizzo del fresato fino al 50% che viene aggiunto al bitume e all'aggregato vergine, precedentemente scaldati a temperature superiori ai 150° con produzione di miscele dette HMA (Hot Mix Asphalt), la seconda è la tecnica "a freddo" dove gli inerti non vengono riscaldati preventivamente ma vengono direttamente aggiunti alla miscela assieme a bitume e fresato e il prodotto finale viene definito come Cold Mix Asphalt, infine la metodologia che sta riscontrando maggior successo negli ultimi tempi è quella cosiddetta "a tiepido", essa permette un confezionamento della miscela a temperature comprese tra i 100 e 140°C ottenendo gli WMA.

Il riciclaggio del conglomerato bituminoso può effettuarsi sia "in situ" che in impianto: il primo consiste nell'effettuare tutte le operazioni in cantiere con il vantaggio di non dover trasportare materiale e di evitarne lo stoccaggio, ma ha lo svantaggio di dover utilizzare macchinari più complessi e costosi; il secondo permette invece prestazioni più elevate al conglomerato prodotto, rendendolo idoneo per tutti gli strati della pavimentazione.

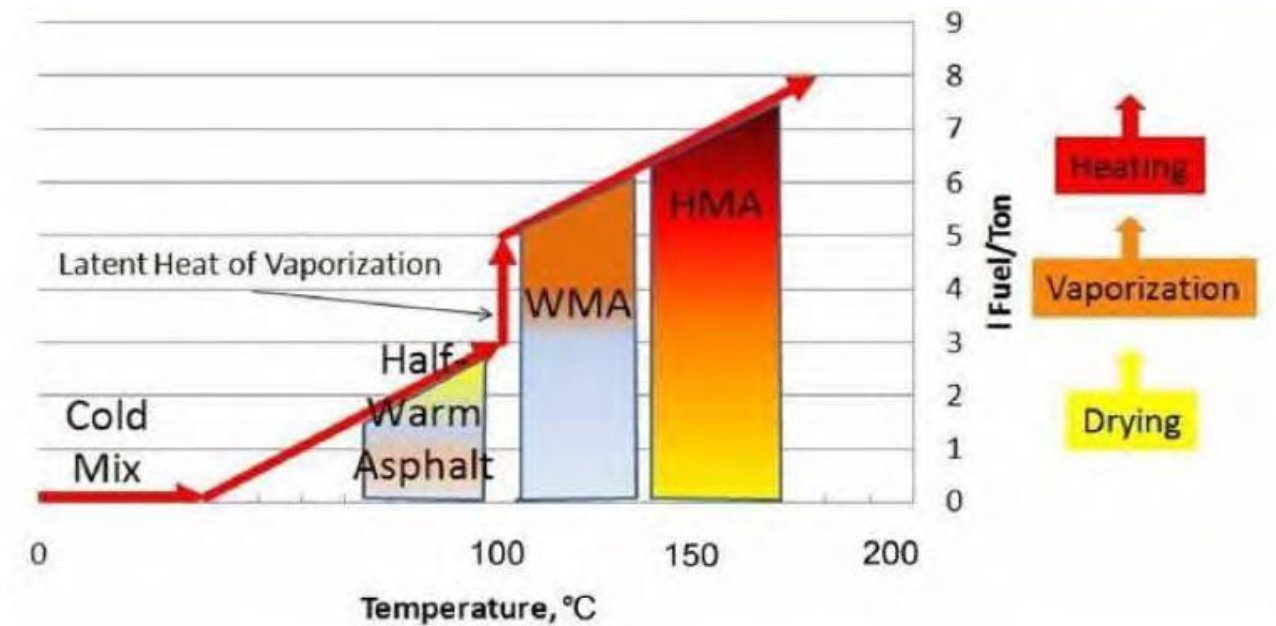


Fig 2.2: Range delle temperature di lavorazione in funzione della tecnologia scelta

Il termine "miscele tiepide" riassume al suo interno tutti i materiali che coniugano il carattere ecologico del conglomerato a freddo con le prestazioni del conglomerato a caldo, oltre ad una notevole riduzione delle temperature di miscelazione e compattazione (Fig. 2.2), vi sono altri numerosi vantaggi che ne conseguono quali:

- ✓ miglioramento delle condizioni lavorative sia in impianto che in sito;
- ✓ diminuzione del consumo energetico con conseguente riduzione di combustibile necessari;
- ✓ aumento delle distanze di trasporto di materiale;
- ✓ minor degrado nel tempo dei mezzi utilizzati;
- ✓ riduzione dell'invecchiamento del bitume causato dalle alte temperature;

- ✓ abbattimento dei tempi di attesa per la riapertura al traffico di tratti di pavimentazione appena messi in opera;
- ✓ Riduzione delle emissioni prodotte in seguito alla combustione di carburanti, sia in fase di produzione che in fase di stesa (Fig. 2.3)



Figura 2.3: produzione di fumi nel caso di HMA (sx) e in caso di WMA (dx)

Ma di certo, il vantaggio più sfruttato nello studio in esame consiste nell'inserimento di una maggior quantità di fresato (RAP) rispetto alle comuni tecniche a caldo (illustrato in Fig. 2.4), senza modificarne la qualità, grazie all'utilizzo di speciali additivi.

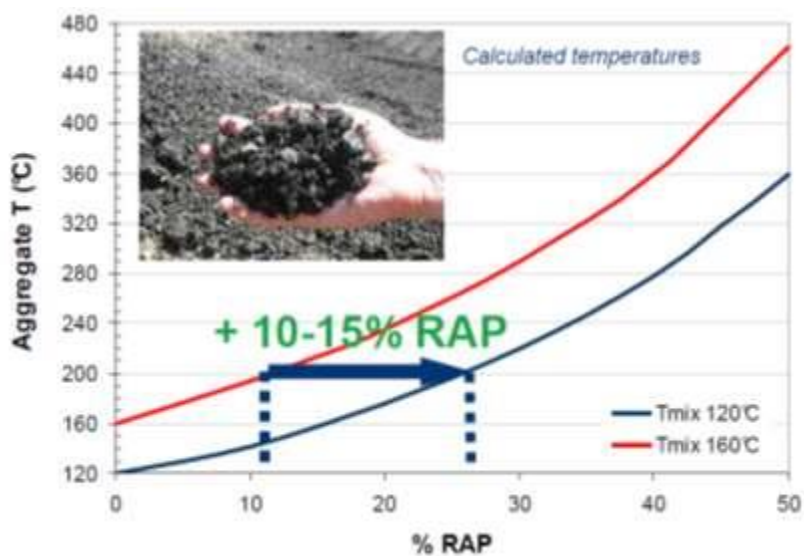


Figura 2.4: percentuali di fresato che è possibile aggiungere a miscele calde e tiepide

L'incertezza riguardo questa tecnica "WARM" risiede nel fatto che è piuttosto recente, quindi prima di essere utilizzata in maniera così diffusa come per le miscele più calde, quelle tiepide devono dimostrare gli stessi standard prestazionali a lungo termine delle HMA.

Non è da sottovalutare inoltre che anche queste miscele presentano alcuni svantaggi:

- Sensibilità all'acqua;
- Poca resistenza all'ormaiamento;
- Debole resistenza alla fessurazione termica;
- Elevati costi degli additivi e dell'eventuale modifica degli impianti produttivi esistenti

Infine un ultimo aspetto di interesse particolare, soprattutto nel confezionamento delle miscele, riguarda il contenuto di bitume, infatti confrontando miscele WMA e HMA, si è stabilito che la percentuale ottima può essere determinata con i tradizionali metodi utilizzati per i conglomerati caldi. Tuttavia, alcuni autori hanno mostrato una certa preoccupazione sulla percentuale ottima di bitume per un conglomerato tiepido per via dei due seguenti aspetti:

- Le basse temperature rispetto quelle di un HMA comportano un minore assorbimento di bitume da parte dell'aggregato e per questo motivo il contenuto di bitume può essere ridotto;
- I WMA hanno una compattazione migliore rispetto ad un HMA e questo comporta un minore contenuto di vuoti all'interno del conglomerato.

Questi due aspetti hanno portato alla conclusione che nella realizzazione del WMA è possibile ridurre la percentuale ottima di bitume, rispetto quella ottenuta con un mix design tradizionale di conglomerato e bitume senza additivo, di mezzo punto percentuale.

3. MATERIALI E MACCHINARI

I materiali utilizzati per la produzione di miscele di tipo WMA per lo strato di usura della pavimentazione sono: aggregati vergini, fresato stradale, bitume tradizionale e additivi chimici. Attraverso l'uso di specifiche quantità di ognuno di essi e sfruttando dei macchinari che verranno spiegati in seguito, si è arrivati al confezionamento dei provini di conglomerato.

3.1 MATERIALI

3.1.1 AGGREGATI

Gli aggregati costituiscono lo scheletro del conglomerato essendone la parte più consistente e trattasi di inerti provenienti da cave di estrazione; nel confezionamento della miscela per il tappeto di usura in esame gli aggregati forniti sono stati:

- Graniglia basaltica 4/8
- Graniglia basaltica 8/14
- Graniglia calcarea 7/12
- Sabbia 0/2
- Filler

Questi materiali, dopo essere stati inseriti all'interno di specifici cassoni (Fig. 3.1 e 3.2), sono stati stesi su di un asse di legno per effettuarne la quartatura riducendone così l'umidità e favorendo un assortimento uniforme.



Figura 3.1 e 3.2: immagini di due cassoni contenenti graniglia e sabbia

Su ognuno di essi è stata poi eseguita un'analisi granulometrica su due campioni per ogni pezzatura andando prima ad essicarli a circa 105° all'interno di specifici forni (Fig. 3.3) situati nel laboratorio, per un tempo necessario affinché si raggiungesse un peso uniforme del materiale, conseguenza della totale perdita di umidità.



Figura 3.3: forno industriale di laboratorio

Dopodiché, per la fase di vagliatura, ogni campione preventivamente pesato è stato messo al di sopra di una pila di setacci con apertura delle maglie decrescenti dall'alto verso il basso, al di sotto dell'ultimo setaccio è stato inserito un fondino metallico mentre al di sopra si è ricorso all'utilizzo di un coperchio onde evitare eventuali perdite; successivamente si è inserita la colonna di vagli all'interno di una macchina vibrante (Fig. 3.4), per un tempo di circa 10 minuti, così da facilitare il passaggio di materiale attraverso i fori.



Figura 3.4: pila di setacci inseriti nella macchina vibrante

Terminato questo passaggio, la pila è stata dunque tolta dal macchinario e si è passati alla pesa dei trattenuti dei singoli setacci e sommando quest'ultimi, al trattenuto cumulativo in corrispondenza dell'apertura dei vagli, si è di fatto passato al passante cumulativo come complemento a cento dei trattenuti; l'obiettivo era costruire la curva granulometrica di ogni campione in esame disponendo di un grafico in cui sull'asse delle ascisse venissero riportate le dimensioni delle aperture dei setacci mentre sulle ordinate i passanti cumulativi percentuali.

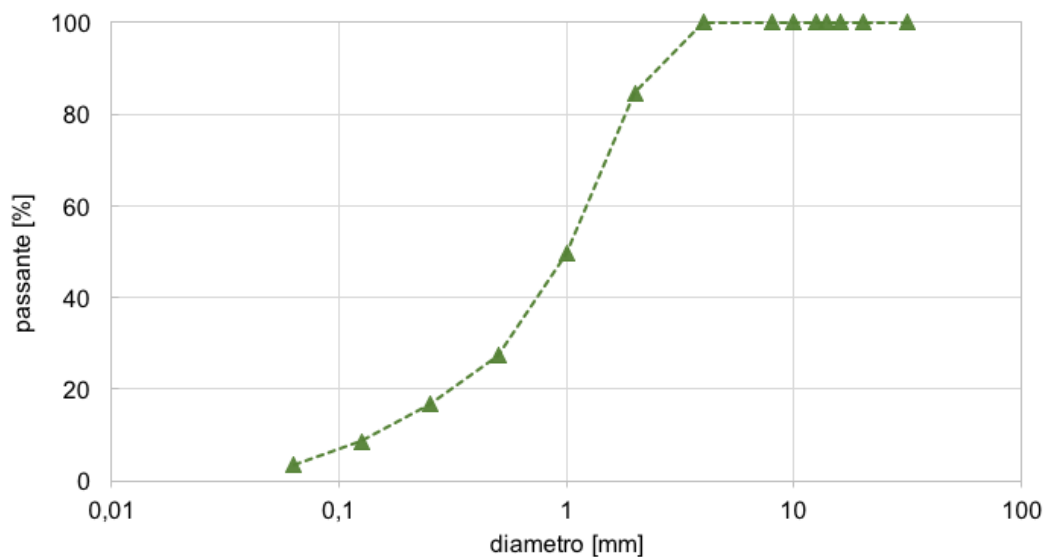


Figura 3.5: Curva granulometrica sabbia 0/2

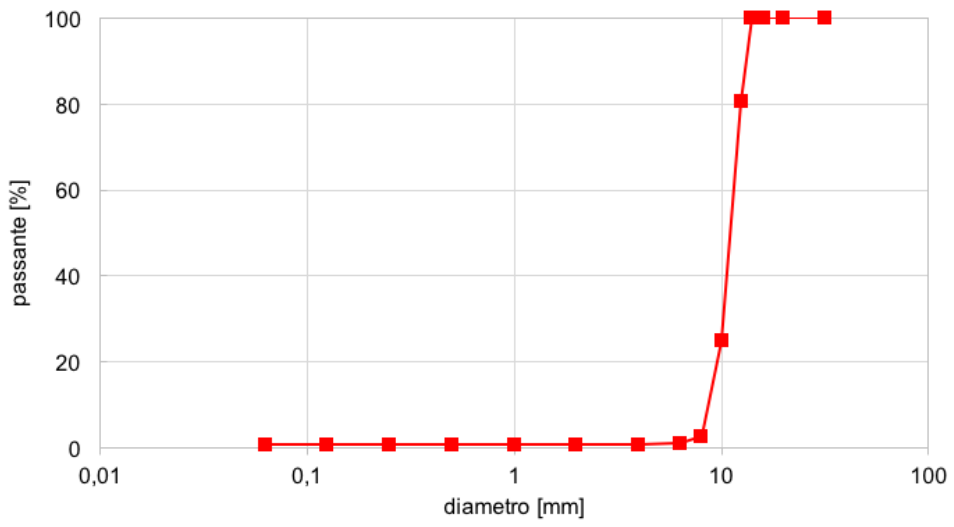


Figura 3.6: Curva granulometrica graniglia basaltica 8/14

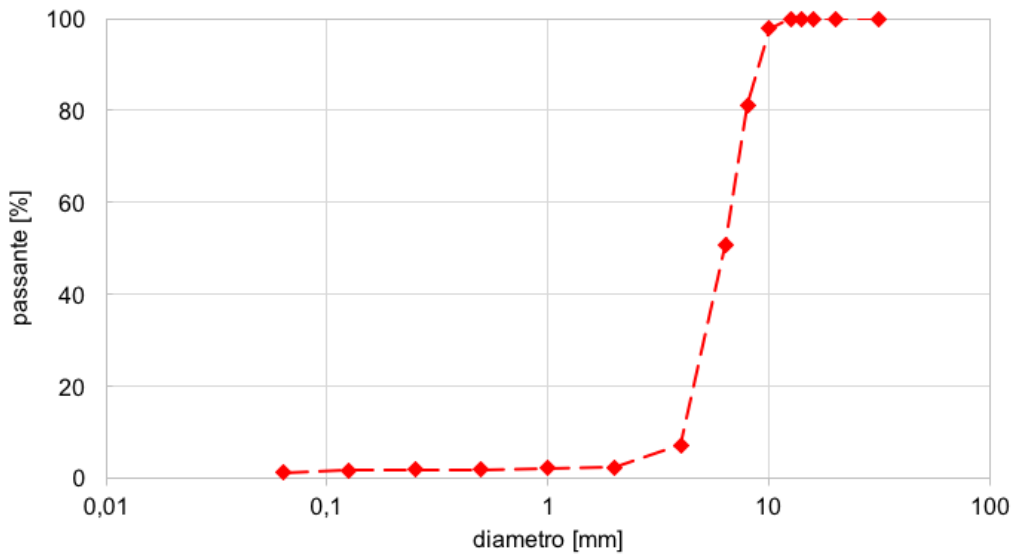


Figura 3.7: Curva granulometrica graniglia basaltica 4/8

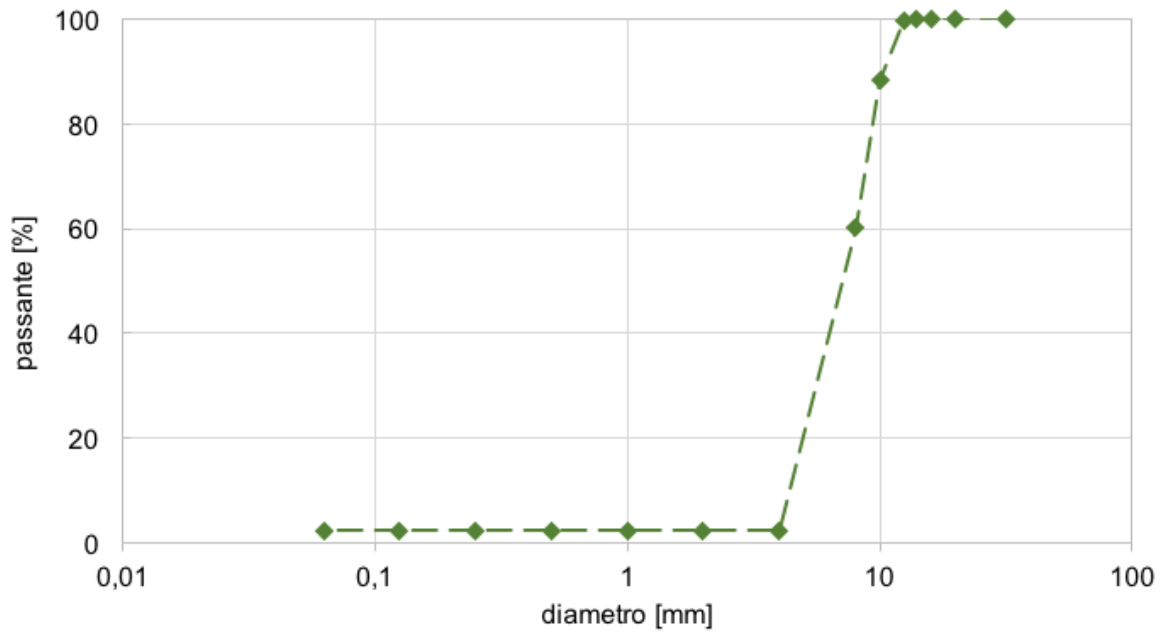


Figura 3.8: Curva granulometrica graniglia calcarea 4/7

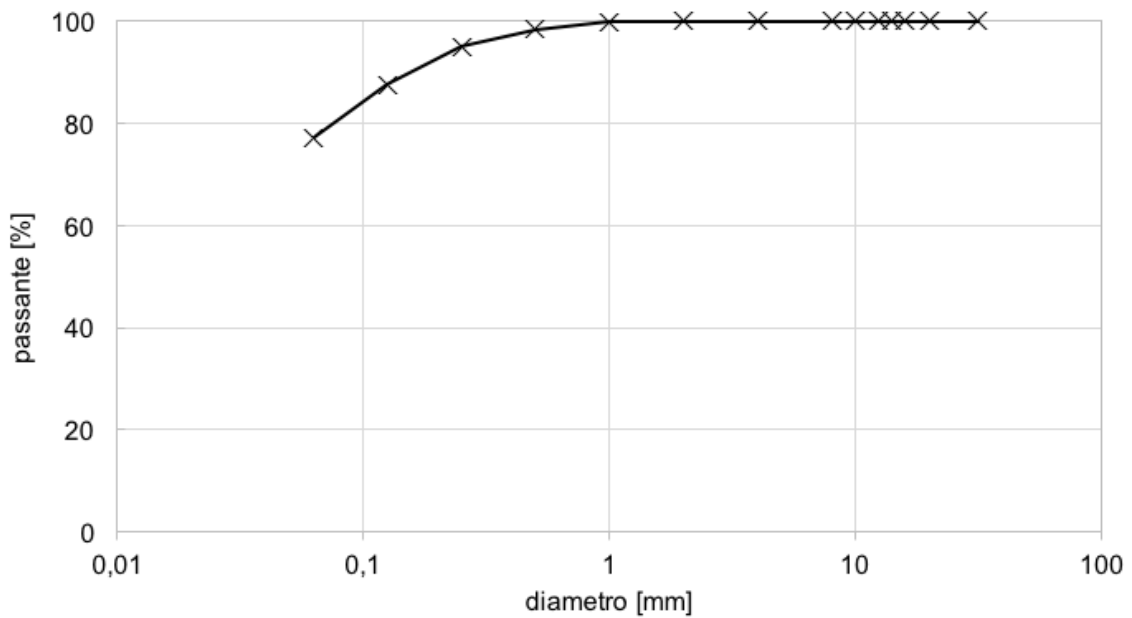


Figura 3.9: Curva granulometrica filler

Un altro tipo di prova effettuata sul materiale è quella relativa agli indici di forma e al coefficiente di appiattimento, i quali permettono di determinare le caratteristiche morfologiche dei singoli grani esclusivamente per aggregati grossi; l'indice di forma si calcola tramite un calibro doppio scorrevole (Fig. 3.10), strumento che presenta 2 aperture che permettono di misurare lunghezza L e spessore E di ogni granulo. La prova consiste nel prendere un quantitativo specifico di terreno essiccato definito come M1 e sottoporlo ad un'analisi di calibrazione separando i granuli con rapporto $L/E > 3$ classificati come non cubici, la massa complessiva dei grani non cubici la definiremo come M2; il calcolo dell'indice di forma (SI: Shape Index) è immediato:

- $SI = (M2/M1) * 100$ (espresso in %)



Fig. 3.10: Calibro doppio scorrevole

Il coefficiente di appiattimento, invece, si determina attraverso una doppia setacciatura ossia dapprima con setacci a maglie quadrate come per l'analisi granulometrica e in seguito con dei vagli a maglie parallele (Fig. 3.11) con aperture di larghezza pari a $D/2$. Si calcola la somma delle masse delle classi granulometriche d/D i-esime e si annota come M_1 , poi si valuta la somma delle masse di ogni classe granulometrica che passa attraverso un corrispondente setaccio a barre che definiremo M_2 ; il coefficiente di appiattimento (FI: Flattening Index) sarà dato da:

- $FI = (M_2/M_1) * 100$



Figura 3.11: setaccio a barre

L'ultima delle analisi effettuate sugli aggregati lapidei corrisponde alla determinazione degli indici LUW (Loose Unit Weight) e RUW (Rodded Unit Weight), ossia il calcolo delle masse volumiche in condizioni sciolte e compattate.

La prova utilizza due diverse tipologie di fustella, a seconda che si tratti di materiale a grana grossa o a grana fine, ma di fatto il procedimento adottato è lo stesso in entrambi i casi; per la determinazione del LUW, dapprima si calcola il peso della fustella vuota (M1), poi si dispone il materiale all'interno attraverso una sessola e aiutandosi a trattenere l'aggregato con una mano, per evitare assestamenti che potrebbero compromettere il risultato finale, si procede poi raschiando il materiale sulla sommità della fustella attraverso una bacchetta di vetro (nel caso di terreno a grana fine) oppure tramite una barra di acciaio (in caso di grana grossa), si pesa dunque il contenitore pieno (M2) e si arriva alla determinazione del peso di materiale contenuto per differenza tra M2 e M1, infine si calcola il Loose Unit Weight:

$$\text{➤ } LUW = \frac{M2 - M1}{V} \quad \text{con } V: \text{ Volume della fustella}$$

$$V_1: 997,95 \text{ cm}^3$$

$$V_2: 5051,63 \text{ cm}^3$$

Per quanto riguarda invece il RUW, si realizzano tre strati all'interno della fustella, ogni strato viene compattato manualmente con 25 colpi attraverso una barra di acciaio ad aderenza migliorata $\phi 20$, l'ultimo strato viene realizzato riempiendo il contenitore di poco oltre l'altezza massima della stessa; completato l'ultimo strato si rimuove il materiale in eccesso con le stesse modalità applicate nel LUW. Avendo già tarato la fustella in precedenza, si determina allora il peso degli aggregati al suo interno per differenza (M2-M1), lo scopo è quello di ottenere il Rodded Unit Weight:

$$\text{➤ } RUW = \frac{M2 - M1}{V} \quad \text{con } V: \text{ Volume della fustella}$$

SABBIA POLVEROSA 0/2

Peso (M1)+Tara=4828,5g
Peso (M1)= 1496,1g
LUW=Peso(M1)/V=1,499g/cm³

Peso (M2)+Tara=5023,3g
Peso (M2)=1690,9g
RUW=Peso(M2)/V=1,694 g/cm³

Peso (M1)+Tara=4831,6g
Peso (M1)=1499,2g
LUW=Peso(M1)/V=1,502g/cm³

Peso (M2)+Tara=5038,9g
Peso (M2)= 1706,5g
RUW=Peso(M2)/V=1,71 g/cm³

GRANIGLIA BASALTICA 8/14

Peso (M1)+Tara=14260,9g	Peso (M1)+Tara=14202,7g
Peso (M1)= 7179,4g	Peso (M1)=7121,2g
LUW=Peso(M1)/V=1,421g/cm ³	LUW=Peso(M1)/V=1,4097g/cm ³
Peso (M2)+Tara=14942,8g	Peso (M2)+Tara=14866,3g
Peso (M2)=7861,3g	Peso (M2)= 7784,8g
RUW=Peso(M2)/V=1,556 g/cm ³	RUW=Peso(M2)/V=1,541 g/cm ³

GRANIGLIA CALCAREA 7/12

Peso (M1)+Tara=14070,9g	Peso (M1)+Tara=14050,4g
Peso (M1)= 6989,4g	Peso (M1)=6968,9g
LUW=Peso(M1)/V=1,384g/cm ³	LUW=Peso(M1)/V=1,3796g/cm ³
Peso (M2)+Tara=14551,8g	Peso (M2)+Tara=14586g
Peso (M2)=7470,3g	Peso (M2)= 7504,5g
RUW=Peso(M2)/V=1,479 g/cm ³	RUW=Peso(M2)/V=1,486 g/cm ³

GRANIGLIA BASALTICA 4/8

Peso (M1)+Tara=14201,8g	Peso (M1)+Tara=14233,2g
Peso (M1)= 7120,3g	Peso (M1)=7151,7g
LUW=Peso(M1)/V=1,409g/cm ³	LUW=Peso(M1)/V=1,416g/cm ³
Peso (M2)+Tara=14739,2g	Peso (M2)+Tara=14793,1g
Peso (M2)=7657,7g	Peso (M2)= 7711,6g
RUW=Peso(M2)/V=1,516 g/cm ³	RUW=Peso(M2)/V=1,527 g/cm ³

3.1.2 FRESATO STRADALE

Per fresato stradale si intende quel materiale che a livello internazionale viene indicato con l'acronimo di RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) il quale, secondo la Normativa di riferimento UNI EN 13108-8, è definito come "conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose", dunque ottenuto tramite

operazioni di scarifica delle pavimentazioni stradali grazie all'utilizzo di macchinari quali scarificatrici, note anche come frese.

Le tipologie di fresato stradale utilizzato all'interno delle miscele in esame sono:

- RAP ATTUALE 0/5 (Fig.
- RAP NON MODIFICATO 0/5

Per quanto riguarda il RAP, sono state effettuate le medesime prove degli aggregati cioè analisi granulometrica (Fig. 3.12 e 3.13), indice di forma, indice di appiattimento e coefficienti LUW e RUW.

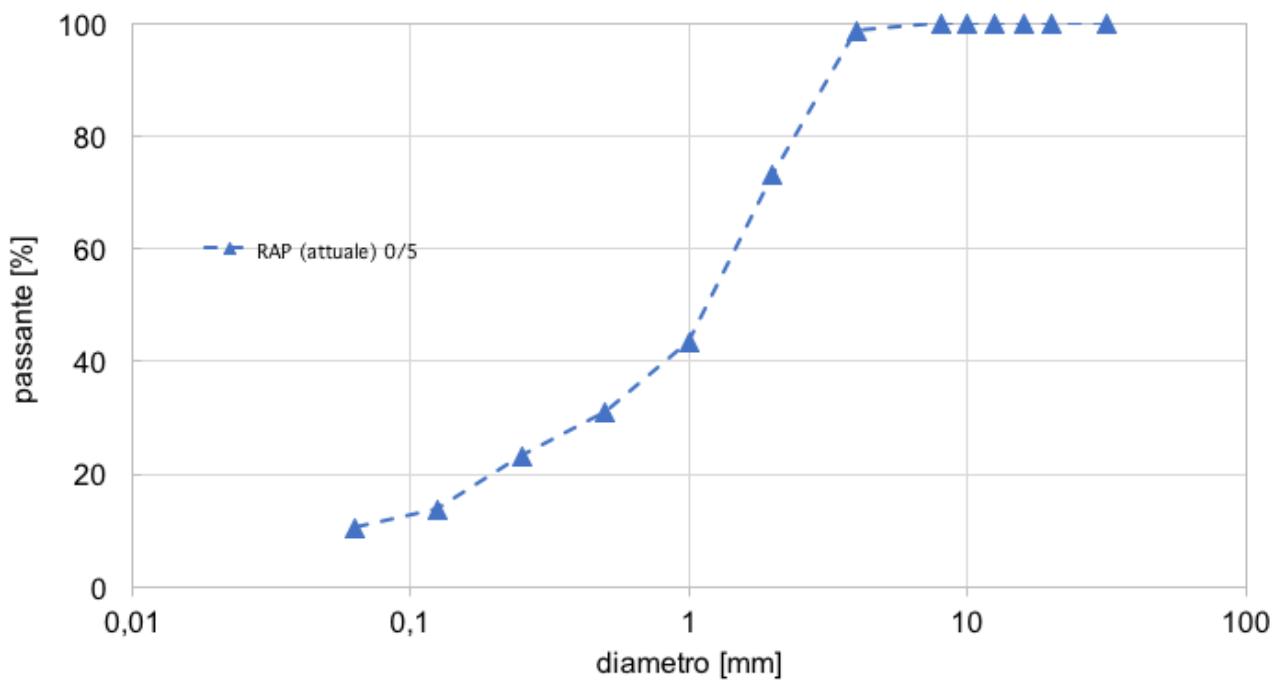


Figura 3.12: Curva granulometrica RAP 0/5 ATTUALE

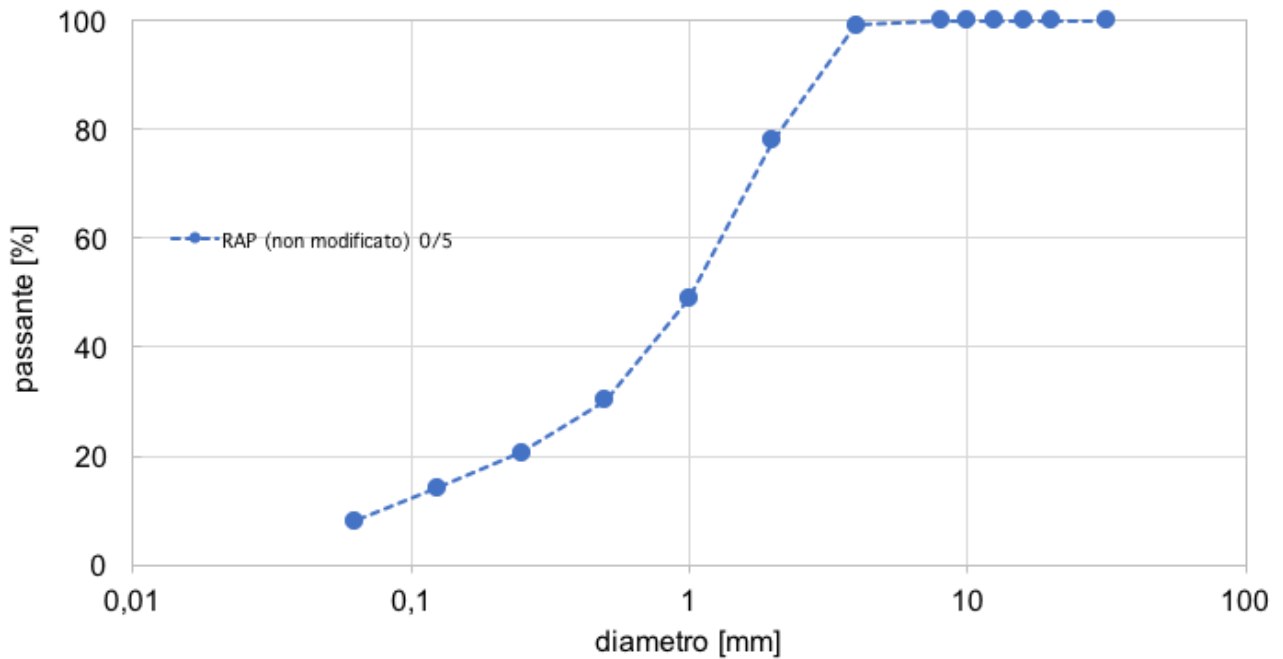


Figura 3.13: Curva granulometrica RAP 0/5 non modificato

Di seguito vengono riportate due ripetizioni fatte per determinare gli indici LUW e RUW:

RAP 0/5 NON MODIFICATO

Peso (M1)+Tara=4629,6g
 Peso (M1)=1297,2g
 $LUW = \text{Peso}(M1)/V = 1,299 \text{ g/cm}^3$

Peso (M1)+Tara=4603,2g
 Peso (M1)=1276,8g
 $LUW = \text{Peso}(M1)/V = 1,279 \text{ g/cm}^3$

Peso (M2)+Tara=4736,1g
 Peso (M2)=1403,7g
 $RUW = \text{Peso}(M2)/V = 1,406 \text{ g/cm}^3$

Peso (M2)+Tara=4736,1g
 Peso (M2)= 1403,7g
 $RUW = \text{Peso}(M2)/V = 1,406 \text{ g/cm}^3$

3.1.3 BITUME

Con il termine legante bituminoso si intende un composto di natura organica derivante dal petrolio, viene inserito all'interno della miscela per conferire coesione ad un ammasso sciolto, presenta un colore scuro ed è dotato di discreta rigidità a basse temperature; la produzione di bitumi stradali tradizionali si basa sostanzialmente sulla distillazione frazionata del greggio portando il composto ad una temperatura di ebollizione molto alta che si aggira attorno ai 450°C.

Il bitume utilizzato nel confezionamento delle miscele è di tipo tradizionale e indicato con la nomenclatura "50/70" (Fig. 3.14), i due valori stanno ad indicare rispettivamente il minimo e il massimo ottenuti in una prova a penetrazione.

Principali caratteristiche chimico/fisiche del bitume tradizionale in esame. (Tab. 1).

DESCRIZIONE PROVA	NORMA	U.d.M	VALORE DICHIARATO
Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	0,1 mm	50-70
Punto di rammollimento	UNI EN 1427	°C	46-54
Penetrazione dopo indurimento	UNI EN 1426	%	>50
Variazione del punto di rammollimento	UNI EN1427	°C	<11

Tabella 1: caratteristiche del bitume 50/70

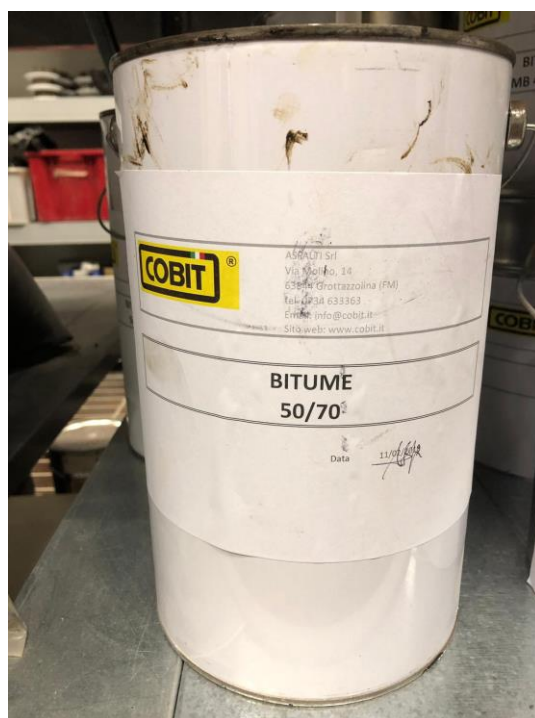


Figura 3.14: Bitume 50/70 utilizzato nella miscelazione

3.1.4 ADDITIVI

Le miscele prodotte in laboratorio presentano al loro interno una tra le due diverse tipologie di additivi chimici, entrambi comunque sono specifici per la gestione delle temperature di produzione dei conglomerati bituminosi e per le produzioni a tiepido (WMA). Tali additivi (Fig. 3.15 e 3.16), aggiunti nel bitume consentono di abbassare la temperatura di produzione, di stesa e compattazione del conglomerato bituminoso, fornendo al contempo un'azione rigenerante e un consistente contributo in qualità di attivante di adesione, garantendo infine anche una buona lavorabilità al conglomerato bituminoso prodotto.

Precedentemente alla fase di miscelazione, essi vengono aggiunti, con una percentuale dello 0.1% sul peso del fresato, all'interno del legante bituminoso in forma liquida; di seguito vengono riportate due tabelle che riassumono alcune caratteristiche chimico/fisiche degli additivi in esame.

ADDITIVO 1

ASPETTO A 25°C	<i>LIQUIDO</i>
COLORE	<i>SCURO</i>
DENSITA' A 25°C	<i>940 kg/cm³</i>
FLASH POINT	<i>>150°C</i>
VISCOSITA' A 25°C	<i>150 cP</i>

ADDITIVO 2

ASPETTO A 25°C	<i>LIQUIDO</i>
POUR POINT	<i>≥-5°C</i>
DENSITA' A 25°C	<i>0.78 g/cm³</i>
FLASH POINT	<i>>90°C</i>
VISCOSITA' A 25°C	<i>30/40 cP</i>



Figura 3.15: additivo 1 e additivo 2

3.2 MACCHINARI

3.2.1 MISCELATRICE

La miscelatrice è il macchinario che permette un mescolamento omogeneo di tutti i materiali precedentemente descritti, è costituita da una parte superiore che presenta la pala di miscelazione supportata da 4 elementi in acciaio (Fig. 3.16)) e una parte inferiore costituita dal cestello su cui versare i materiali precedentemente scaldati.



Figura 3.16: miscelatrice aperta con pala di miscelazione



Figura 3.17: Miscelatrice chiusa

Essa presenta inoltre un display laterale su cui possono essere impostati a temperatura dell'olio circolante all'interno del cassone e i tempi di rotazione delle pale garantendo dapprima la miscelazione dei soli aggregati, successivamente quella con bitume ed infine del filler.

Oltre al display vi è una pulsantiera che permette: di aprire o chiudere la parte superiore mobile della macchina, la rotazione sul proprio asse e la rotazione rispetto l'orizzontale del cestello inferiore, accendere e spegnere la macchina, modificare il verso di miscelazione delle pale (in senso alternato per miscele di peso inferiore ai 25 Kg) (Figura 3.18).

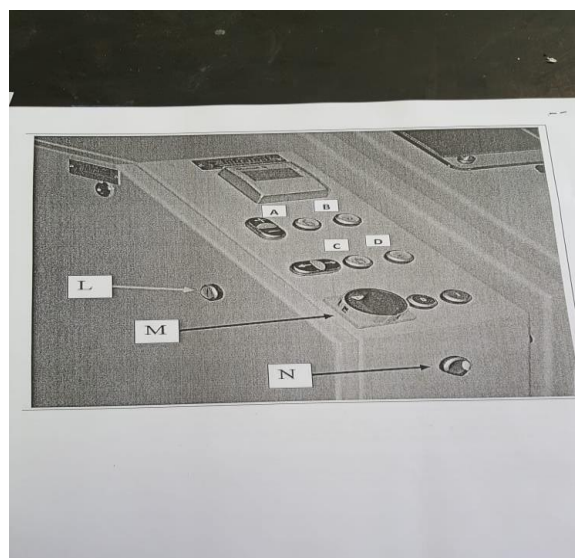


Figura 3.18: Pulsantiera della macchina di miscelazione

La prima cosa da fare è accendere la miscelatrice, ruotando la manopola “M” dopo essersi assicurati l’attivazione tramite corrente elettrica; una volta accesa, il display richiederà all’operatore l’apertura e la chiusura completa della parte superiore. Per fare questo, bisogna tenere premuti il tasto “L” ed il tasto “A” fino ad apertura massima, per poi richiudere tenendo premuti contemporaneamente i tasti “L” e “C”.

Tutte le operazioni di apertura, chiusura e rotazione del cestello vanno fatte tenendo premuto il tasto “L”, questo per mettere in completa sicurezza l’operatore.

Una volta chiusa la macchina, comparirà sullo schermo il menu principale (Fig.3.19).

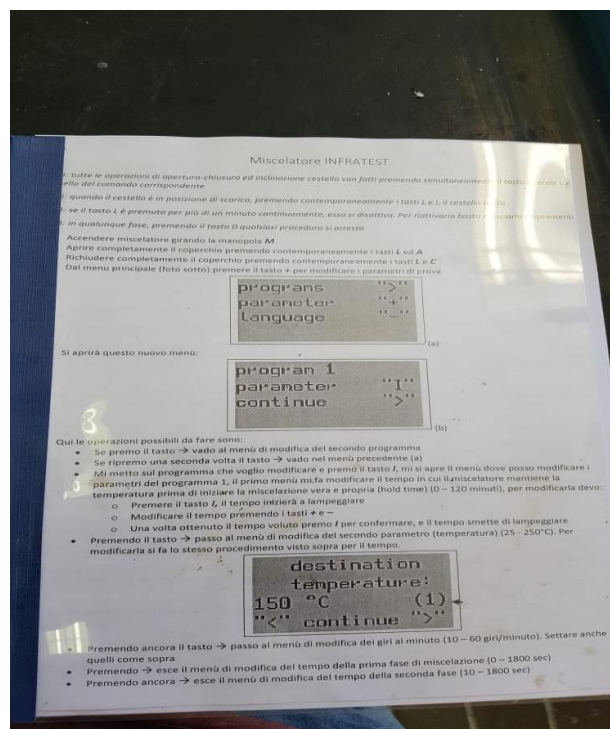


Figura 3.19: Menu principale

A questo punto il macchinario è pronto per essere impostato; ci sono di base due programmi ognuno dei quali presenta due fasi distinte. Dato che la miscelazione effettiva è costituita da tre fasi (aggregati, aggregati con aggiunta di bitume, aggregati più bitume più filler), la prima fase del primo programma verrà impostata in modo da avere tempo di miscelazione nullo. Per farlo, bisogna premere il tasto “+” così da aprire la schermata delle impostazioni.

Occorrerà ora premere "I" ed impostare "Mixing Time" pari a zero usufruendo dei comandi "+" e "-"; premendo ">" è possibile impostare anche la temperatura di miscelazione e l'Hold Time (tempo in cui la macchina si mantiene alla temperatura prefissata) riferiti al programma 1, è inoltre possibile scegliere la durata della seconda miscelazione riferita al primo programma (nel caso in esame 30 secondi). Per proseguire con il programma 2 si deve tornare alla tendina delle impostazioni e premere nuovamente ">" in modo da settare le nuove durate di miscelazione ossia 120 secondi per la fase di aggregati più bitume e 180 secondi per la fase di miscelazione con filler.

Giunti a questo punto, la macchina è pronta per iniziare la fase di riscaldamento e, raggiunta la temperatura prefissata, è necessario l'avvio del programma 1; trascorso l' Hold Time, il miscelatore dovrà essere aperto e dovranno essere aggiunti gli aggregati.

Premendo il tasto "I" come suggerito dalla macchina, verrà avviata la miscelazione; al termine del primo programma, è necessario avviare il secondo come descritto in precedenza.

Di seguito verranno riportate le fasi necessarie all'ottenimento del conglomerato bituminoso secondo i processi illustrati:

- Miscelazione aggregati (Fig. 3.20).



Figura 3.20: aggregati versati nella macchina

- Miscelazione aggregati con bitume: prima e dopo (Fig. 3.21).

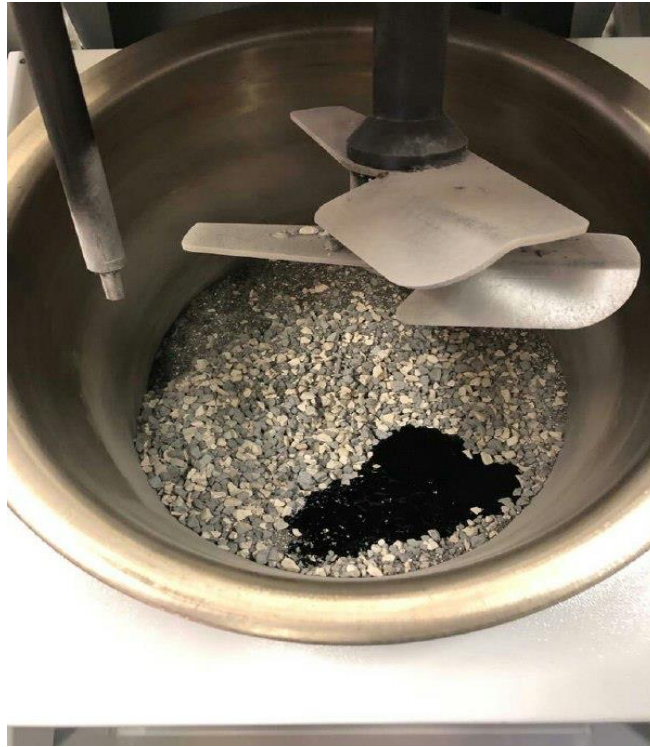


Figura 3.21: bitume aggiunto dopo la miscelazione degli aggregati

- Miscelazione con filler (Fig. 3.22).



Figura 3.22: immagine antecedente all'ultima fase della miscelazione

- Conglomerato finale ottenuto (Fig. 3.23 e 3.24).



Figura 3.24: conglomerato finale versato nella teglia

3.2.2 PRESSA GIRATORIA

La realizzazione dei provini è stata effettuata mediante pressa a taglio giratoria, composta da un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, un pistone che simula l'applicazione di un carico verticale e una base rotante

Presenta, inoltre, un display dal quale è possibile impostare il tipo di prova (a numero di giri imposti o ad altezza imposta), la pressione (600 kPa) e il diametro del provino.

Nel caso in esame i provini sono stati realizzati secondo una compattazione ad un prefissato numero di giri pari a $N_2=100$ (per la valutazione della % di vuoti) e a $N_3=180$ (per la successiva caratterizzazione meccanica tramite trazione indiretta).

Dopo essersi assicurati il raggiungimento della temperatura di 110°C sia del conglomerato che della fustella, inizia la fase di compattazione, si inserisce perciò il materiale nella fustella (avente diametro pari a 150 mm) (Fig. 3.25) e la si trasferisce all'interno della pressa giratoria, precedentemente impostata ad un preciso numero di giri sul display, dopo aver posizionato correttamente la fustella, è possibile avviare la macchina facendo così scendere un perno che permetta, insieme al movimento ondulatorio della base, la compattazione del conglomerato.

Alla fine di questa fase, sfruttando un sollevatore idraulico collocato lateralmente alla pressa, si riesce ad estrarre il provino (Fig. 3.26) il quale subirà poi ad ulteriori prove.



Figura 3.25: Fustella di diametro pari a 150 mm



Figura 3.26: estrazione del provino dalla fustella

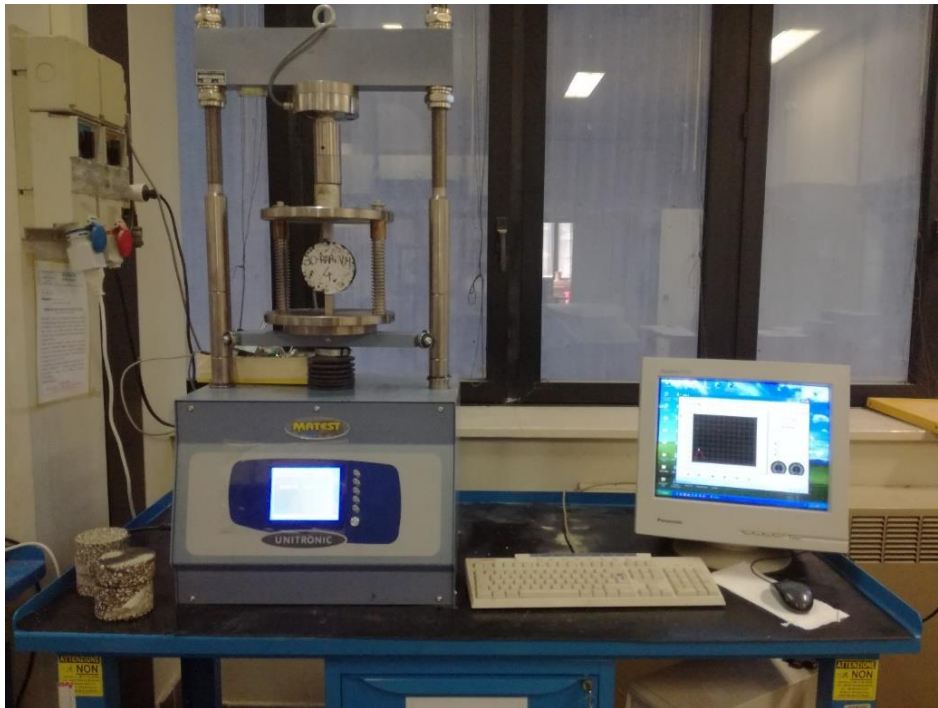


Figura 3.27: Immagine della pressa giratoria con display nella parte in alto a dx

3.2.3 PRESSA MECCANICA UNIVERSALE

La trazione indiretta permette di valutare le caratteristiche di resistenza dei provini preparati in precedenza con la pressa giratoria, per il tappeto di usura in esame alcuni provini sono stati valutati dopo essere stati immersi in acqua per 14 giorni e dopo la disposizione di essi all'interno della camera climatica a 25°C insieme agli altri rimasti all'aria nei giorni precedenti.

La prova è strutturata in diverse fasi: nella prima si impostano i valori di altezza peso e diametro di ogni provino, nella terza si posiziona poi quest'ultimo tra due basette e lo si allinea correttamente, la terza fase consiste nell'esecuzione effettiva della prova, calcolo dei valori ricavati e archiviazione di essi; verranno perciò fuori sei risultati corrispondenti ad altrettanti provini.



(Figura 3.28: immagine della pressa meccanica universale)

Viene testato ogni provino andando a prenderne uno di volta in volta dalla camera climatica, lo si inserisce tra le due barre metalliche parallele e infinitamente rigide del macchinario in modo tale che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello superiore sia perfettamente parallelo al listello inferiore; dopodiché può essere fatta partire l'indagine vera e propria (Fig. 3.28).

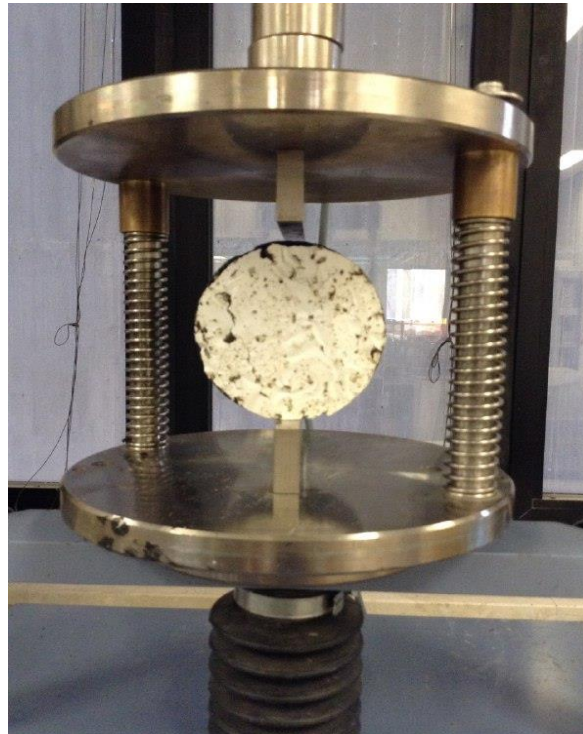


Figura 3.28: Posizionamento del provino

Dal computer vengono inseriti i dati input del provino, quali massa, diametro e altezza attraverso l'apertura della prima finestra de software; la fase successiva permette di avviare la fase di rottura controllando la velocità di deformazione e misurando il carico applicato; la piastra di carico inferiore vien infatti fatta avanzare alla velocità di 50 ± 2 mm/min. Il sistema consente di misurare sia la deformazione subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso; i valori sono leggibili nella finestra del computer insieme alla curva sforzo-deformazione ottenuta (Fig. 3.29).

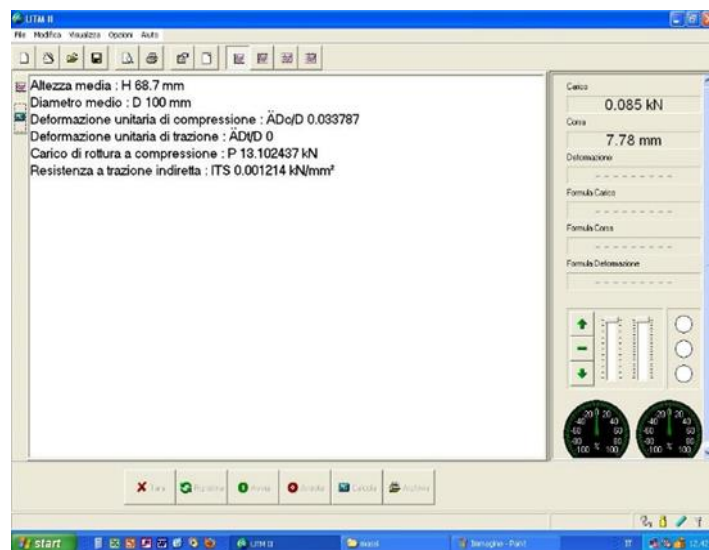


Figura 3.29: esempio di dati ottenuti dalla prova

Risultati: I risultati che vengono calcolati saranno perciò:

- $\frac{\Delta D}{D}$: deformazione unitaria di compressione
- P_{\max} : carico massimo di rottura a compressione (in kN)
- ITS: resistenza a trazione indiretta (in kPa). Essa risulta essere calcolata dalla seguente formula:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot t \cdot D}$$

in cui:

- P_{\max} è il carico massimo espresso in N;
- t è l'altezza del provino espressa in mm;
- D è il diametro del provino in mm.



Figure 3.30 e 3.31: immagini di un singolo provino e di tutti quelli testati

4.PROGRAMMA SPERIMENTALE

4.1 PREPARAZIONE MISCELE

Obiettivo di quest'analisi sperimentale è quello di valutare le prestazioni meccaniche e volumetriche delle miscele di conglomerato bituminoso per uno strato di usura al variare, rispetto ad una miscela tradizionale, di alcune componenti quali:

- Tipologia di additivo
- Quantitativo di bitume
- Percentuale di fresato

Per evitare di confondere tra loro i diversi provini confezionati, si è deciso di utilizzare una nomenclatura alfanumerica in cui la lettera iniziale sta ad indicare lo strato di pavimentazione analizzato, la prima cifra rappresenta la tipologia di additivo aggiunta, i due numeri successivi si riferiscono alla percentuale di fresato stradale riferito al totale di aggregati, infine le ultime due cifre indicano quanto bitume è stato aggiunto rispetto agli aggregati.

Esempio: C2-20-4.1 (Figura 4.1)

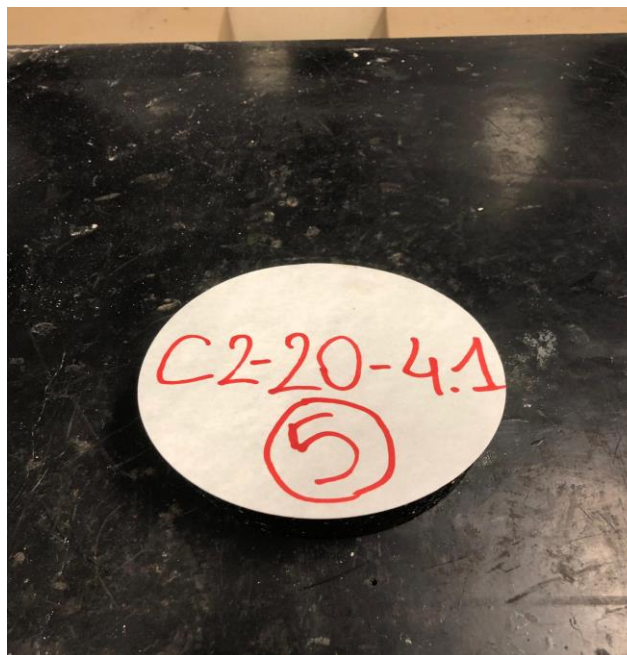


Figura 4.1: esempio di nomenclatura

Il confezionamento delle miscele è stato eseguito attraverso un procedimento standardizzato: inizialmente gli aggregati sono stati prelevati dai rispettivi cassoni e riscaldati alla temperatura di 120°C in un forno industriale all'interno di specifiche teglie di alluminio per un tempo di tre ore.

Il bitume tradizionale invece è stato riscaldato per due ore alla temperatura di 160°C in un altro forno; raggiunto un discreto stato di fluidità, al suo interno è stato mescolato uno dei due additivi, precedentemente pesato attraverso una bilancia millesimale (Fig. 4.2) per una misurazione più accurata.

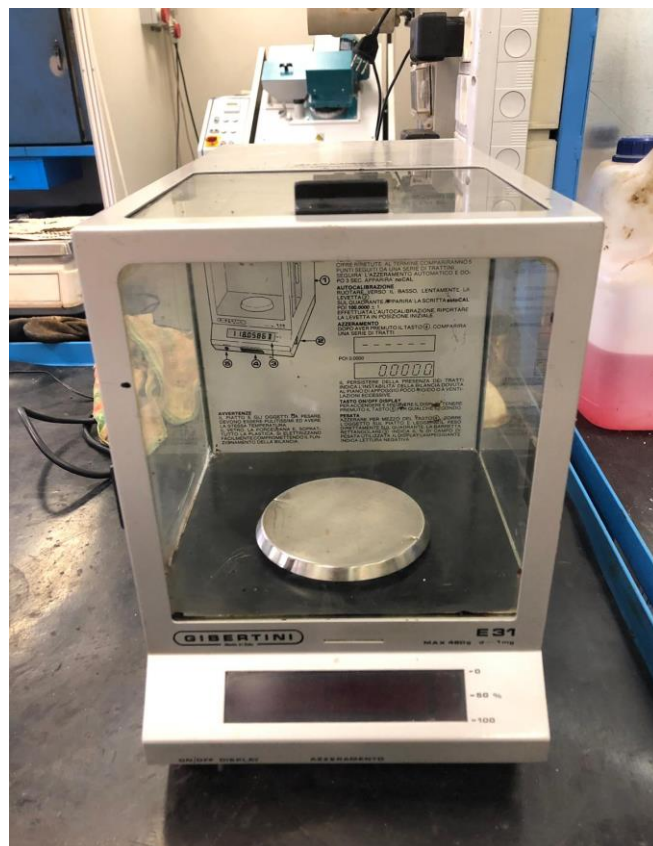


Figura 4.2: Bilancia millesimale usata per misurare il peso degli additivi

A questo punto, dopo aver impostato correttamente la macchina di miscelazione, sono stati inseriti al suo interno gli aggregati riscaldati (ad eccezione del filler) insieme al fresato per una miscelazione preliminare; terminata questa breve fase è stato versato il quantitativo di bitume additivato avvalendosi di una bilancia elettronica per poi dare inizio alla seconda fase di miscelazione. Conclusasi quest'ultima è stato infine aggiunto il filler e avviata la fase finale; al termine di essa è stato ribaltato il cestello così da depositare il conglomerato su di una teglia per poi essere trasferita rapidamente all'interno di un forno preriscaldato alla temperatura di compattazione di 110°C e prontamente suddiviso in nove teglie da 2270 grammi (Fig. 4.3).



Figura 4.3: conglomerato bituminoso nelle teglie

Dopo essersi accertati del raggiungimento delle temperature prefissate, è stato possibile dare inizio alla fase di compattazione: il conglomerato contenuto all'interno di ogni teglia viene inserito in una fustella, preriscaldata alla medesima temperatura, di dimensioni diametrali di 150 mm con l'aiuto di un imbuto metallico, grazie ad esso sono state evitate eventuali perdite di materiale; si è poi collocata correttamente la fustella nella pressa giratoria, impostata precedentemente ad un preciso numero di giri.

Infatti, dei nove campioni di conglomerato preparati, sei sono stati valutati imponendo alla macchina di compiere 180 giri così da produrre provini utilizzabili nella successiva fase di trazione indiretta; dei restanti tre invece, uno è stato valutato a 180 giri, gli altri due a 100 (per questi due provini si registrano le altezze del provino ogni 5 giri compiuti dalla macchina) ma con lo stesso obiettivo ossia calcolarne l'addensamento e di conseguenza, le masse volumiche.



Figura 4.5: Fustella nella pressa giratoria

Completati i giri richiesti, il macchinario entra in modalità "self-parking", il pistone risale verso l'alto e la fustella può essere rimossa dalla macchina; si conclude l'operazione collocando la fustella al di sopra dell'estrattore rigido, quest'ultimo è collegato ad un martinetto idraulico che rende possibile l'estrazione del provino compattato.

Per quanto concerne la massa volumica, essa è stata calcolata sia come geometrica che come apparente; la prima seguendo la formula:

$$\rho_{geom} = \frac{M1}{\frac{\pi}{2} \times h \times d^2}$$

dove:

ρ_{geom} : massa volumica geometrica del provino, espressa in kg/m^3

M1: massa del provino asciutto, in grammi (g)

h: altezza del provino, misurata per mezzo di un calibro ed espressa in millimetri (mm)

d: diametro del provino (150 millimetri)

La misurazione della massa volumica apparente (SSD) segue invece una differente formulazione:

$$\rho_{SSD} = \rho_w \frac{M1}{M3 - M2}$$

dove:

DENSITA': massa volumica apparente (SSD), in kg/m^3

M1: massa del provino asciutto, in grammi (g)

M2: massa del provino in acqua, misurato attraverso una bilancia idrostatica ed espresso in grammi

M3: massa del provino saturato con la superficie asciutta, in grammi (g)

ρ_w : massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, espressa in kg/m^3

La determinazione della temperatura dell'acqua in cui si trovano i provini in esame è effettuata tramite l'utilizzo di una sonda (Fig. 4.6)



Figura 4.6. Sonda elettronica



Figure 4.7 e 4.8: Bilancia e cestello utilizzate per il calcolo delle masse volumiche



Figura 4.9: Provini in una bacinella d'acqua

L'ultima fase dello studio relativo ai provini preparati con le miscele consiste nella prova di trazione indiretta, si effettua tramite un macchinario apposito collegato ad un computer in "Remote Control". Seguendo esattamente le istruzioni fornite dal Capitolato, tre dei sei provini necessari per la prova devono essere immersi in acqua per un tempo pari a 15 giorni prima di essere testati mentre i restanti tre sono stati riposti su di uno scaffale a contatto diretto con l'aria.

Passato quest'intervallo, tutti i provini, sia quelli umidi che quelli asciutti, vanno collocati per un tempo di circa tre ore all'interno di una camera climatica (Fig. 4.9) preimpostata alla temperatura di 25°C prima di essere inseriti nella macchina della trazione indiretta.



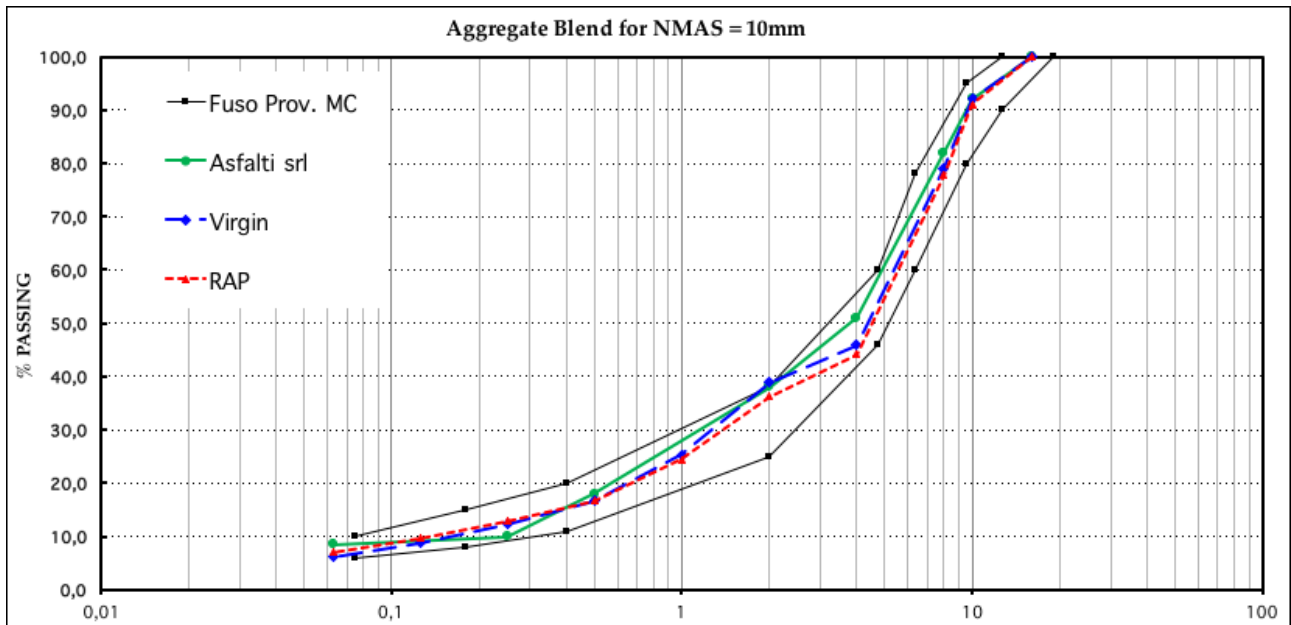
Figura 4.10: Camera climatica con provini al suo interno

4.2 FUSI GRANULOMETRICI DELLE MISCELE

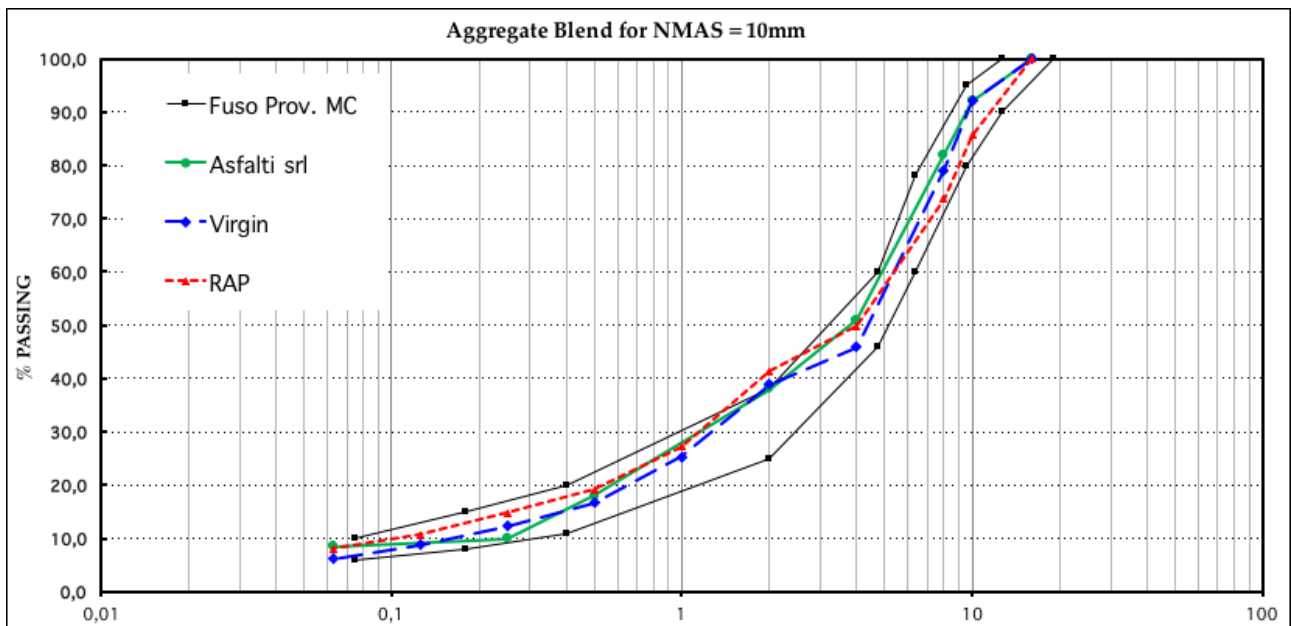
Nello studio in esame sono state realizzate 9 miscele totali:

- 1 tradizionale con tecnica di riciclaggio a caldo
- 8 prodotte con tecnologie a tiepido (WMA)

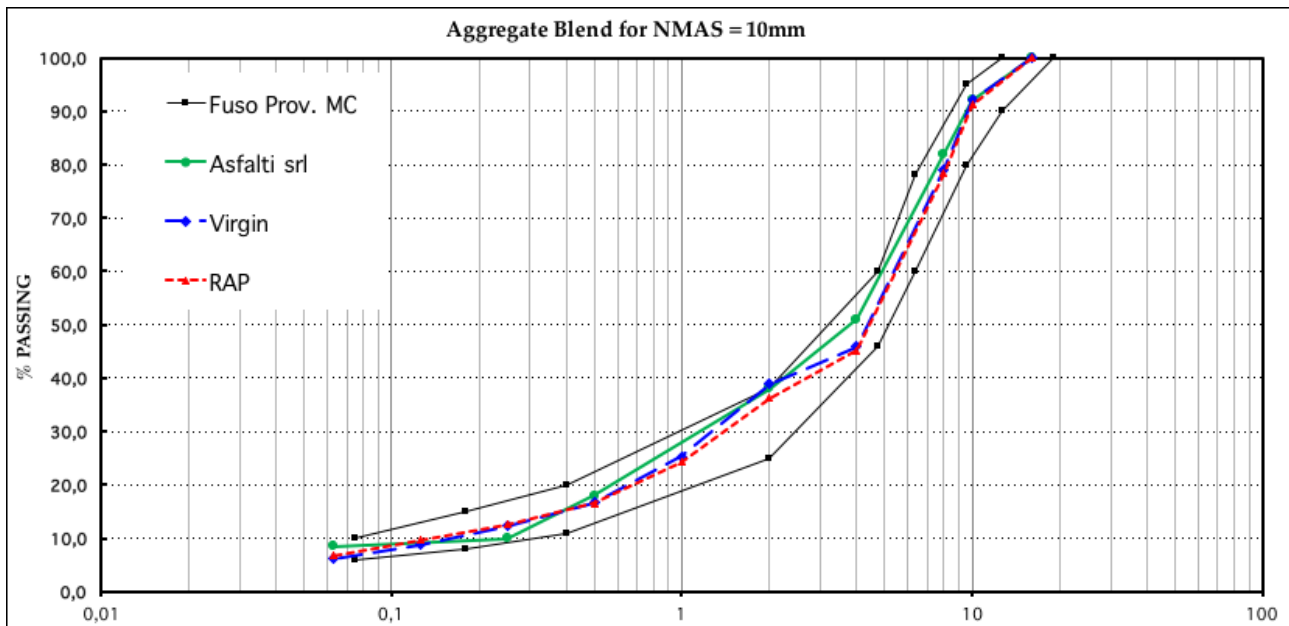
TAPPETO 0/15 TRADIZIONALE



TAPPETO 0/15 RAP 20



TAPPETO 0/15 RAP 30



L'indagine svolta ha lo scopo di ridurre al minimo l'utilizzo di materiale nuovo, massimizzando il quantitativo di fresato stradale (RAP) minimizzando il bitume aggiunto.

Per questo sono state costruite tre differenti curve differenziate dal quantitativo di fresato inserito, rispettivamente 20 e 30 %; tali percentuali, oltre a dover ricadere nel fuso, devono garantire un adeguato quantitativo di bitume, quest'ultimo è dato da quello aggiunto direttamente sommato a quello riattivatosi nel fresato.

Dal punto di vista teorico si considera che nelle miscele tradizionali il 30% del bitume contenuto nel RAP non si riattivi, percentuale che sale al 40% nelle miscele WARM per via delle inferiori temperature in gioco.

5.RISULTATI DELLE PROVE

Il confezionamento dei nove provini per ogni miscela di conglomerato tiepido è stata eseguita al fine di valutare le prestazioni volumetriche, in termini di vuoti residui, e meccaniche, con riferimento al coefficiente di trazione indiretta e la suscettività all'acqua.

Dei nove provini prodotti, tre sono stati utilizzati per la valutazione del grado di addensamento, di cui uno è stato realizzato con un numero di giri pari a 100 giri (corrispondente a N2 come da Capitolato della provincia di Macerata), e due con un numero di giri pari a 180 (N3); i restanti sei invece sono stati esaminati attraverso una prova di trazione indiretta, tre in condizione asciutte(dry) e tre in condizioni bagnate (wet).

I risultati ottenuti, esposti in seguito, dovranno essere confrontati con i range contenuti nella tabella del Capitolato (Tab. 5.1) per accertarsi che rispettino le limitazioni imposte.

Tappeto 0-15 Provincia di Macerata

% bitume rispetto miscela (con fresato)	5.2-6.0
Diametro provino [mm]	150
N1	10
N2	100
N3	180
Vuoti a N1 rotazioni [%]	10-14
Vuoti a N2 rotazioni [%]	4-6
Vuoti a N3 rotazioni [%]	>2
Resistenza a trazione indiretta a 25 °C [N/mm ²]	>0.6 (a N2 rotazioni)
Coefficiente a trazione indiretta a 25°C [N/mm ²]	>50 (a N2 rotazioni)
Perdita resistenza trazione indiretta a 25 °C dopo 15 giorni immersione in acqua [%]	25

Tab. 5.1: Requisiti di Capitolato

5.1 GRADO DI ADDENSAMENTO

Per il calcolo delle masse volumiche e, contemporaneamente, dei vuoti residui delle miscele in esame, ci si è riferiti alla Normativa UNI EN 12697-6:

Massa volumica DRY (procedura A):

$$\rho_{dry} = \rho_w \frac{M1}{M1 - M2}$$

Massa volumica SSD (procedura B):

$$\rho_{SSD} = \rho_w \frac{M1}{M4 - M3}$$

Massa volumica geometrica (procedura C):

$$\rho_{geom} = \frac{M1}{\frac{\pi}{2} \times h \times d^2}$$

Massa volumica massima:

$$\rho_{MAX} = \frac{100}{\left(\frac{B}{\rho_{bit}} + \frac{Agg}{\rho_{agg}}\right)}$$

B = contenuto di bitume rispetto miscela

r_{bit} = massa volumica bitume

Agg = contenuto di aggregato

r_{agg} = massa volumica aggregati ()

M1= massa in aria del campione

M2= massa del campione in acqua (dopo 5 minuti di immersione)

M3= massa del campione in acqua (dopo 30 minuti di immersione)

M4= massa del campione a SSD

h = altezza media del provino (mm)

Vuoti residui (%):

$$V_i = \frac{\rho_{max} - \rho_i}{\rho_{max}} * 100$$

ρ_i : massa volumica i-esima relativa alla tipologia di calcolo dei vuoti residui (dry, SSD, geometrica)

Di seguito verranno riportate le tabelle contenenti i risultati ottenuti dalle masse volumiche e dai vuoti calcolati seguendo le formulazioni della Normativa, inoltre saranno inseriti delle curve relative alla compattabilità e ai vuoti residui rielaborati a partire dai dati restituiti dalla pressa giratoria.

I grafici, riferiti a provini addensati ad N3 (180 giri), presentano sull'asse delle ascisse il numero di giri eseguiti e sull'asse delle ordinate la compattabilità o i vuoti residui come complemento a cento di C_{corr} , ossia:

$$C_{corr} = \frac{\rho_{SSD} * h_{finale}}{\rho_{max} * h_i} * 100$$

$$V_{corr} = 100 - C_{corr}$$

TAPPETO 0-15 TRADIZIONALE ($\rho_{max} = 2,446$)

Provino 1 (a 100 giri)			Provino 2 (a 180 giri)		
M1=	2277,7	g	M1=	2271,0	g
M2=	1329,5	g	M2=	1334,7	g
M3=	1331,6	g	M3=	1335,9	g
M4=	2282,0	g	M4=	2273,8	g
h =	55,5	mm	h =	54,5	mm
d =	150	mm	d =	150	mm
T _w	19,7	°C	T _w	17,7	°C
ρ _w	0,99834	g/cm ³	ρ _w	0,99872	g/cm ³

Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2279,1	g
M2=	1340,5	g
M3=	1342,1	g
M4=	2281,7	g
h =	55	mm
d =	150	mm
T _w	17,7	°C
ρ _w	0,99872	g/cm ³

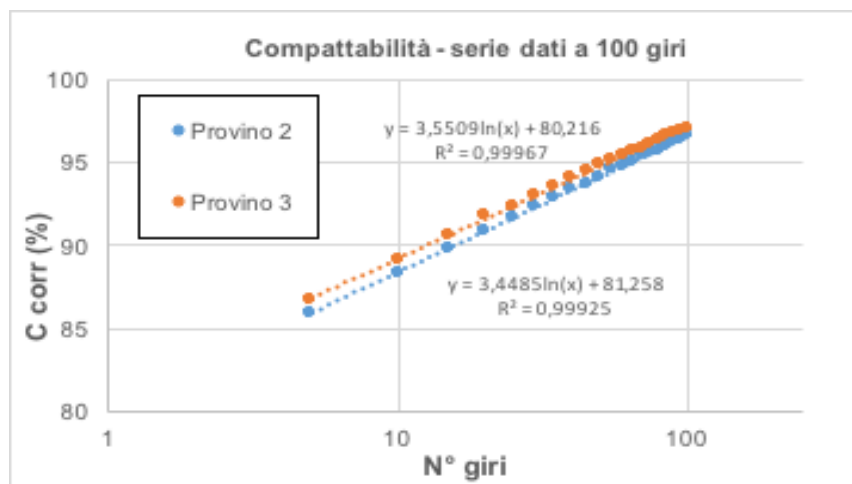
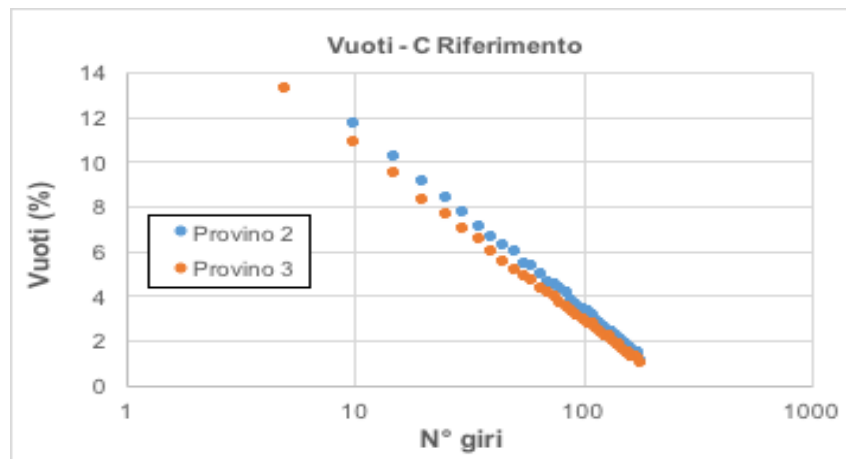
ρ _{dry}	2,398	g/cm ³	ρ _{dry}	2,422	g/cm ³
ρ _{SSD}	2,393	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,418	g/cm ³
ρ _{geom}	2,322	g/cm ³	ρ _{geom}	2,358	g/cm ³

ρ _{dry}	2,425	g/cm ³
ρ _{SSD}	2,423	g/cm ³
ρ _{geom}	2,345	g/cm ³

Vuoti _{dry}	1,95	%
Vuoti _{SSD}	2,17	%
Vuoti _{geom}	5,05	%

Vuoti _{dry}	0,96	%
Vuoti _{SSD}	1,12	%
Vuoti _{geom}	3,59	%

Vuoti _{dry}	0,85	%
Vuoti _{SSD}	0,95	%
Vuoti _{geom}	4,12	%



MISCELA C1-20-4.1 ($\rho_{max} = 2,441$)

Provino 1 (a 100 giri)		
M1=	2271,3	g
M2=	1311,3	g
M3=	1312,2	g
M4=	2282,8	g
h =	56,5	mm
d =	150	mm
T _w	19,1	°C
ρ _w =	0,99846	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,362	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,336	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,275	g/cm ³

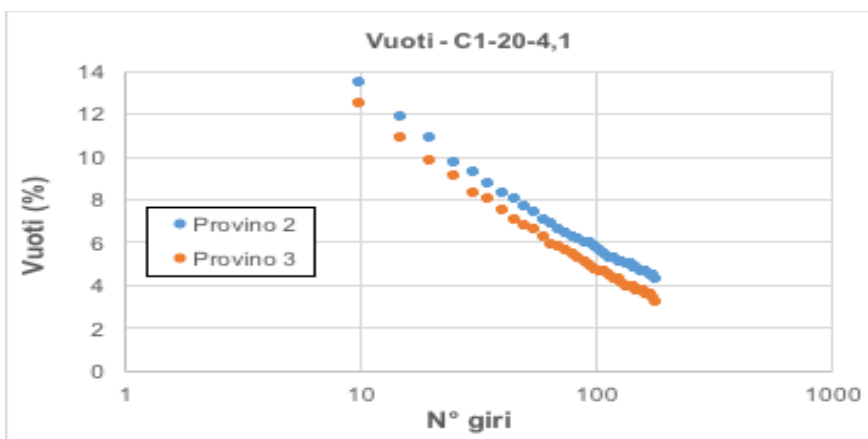
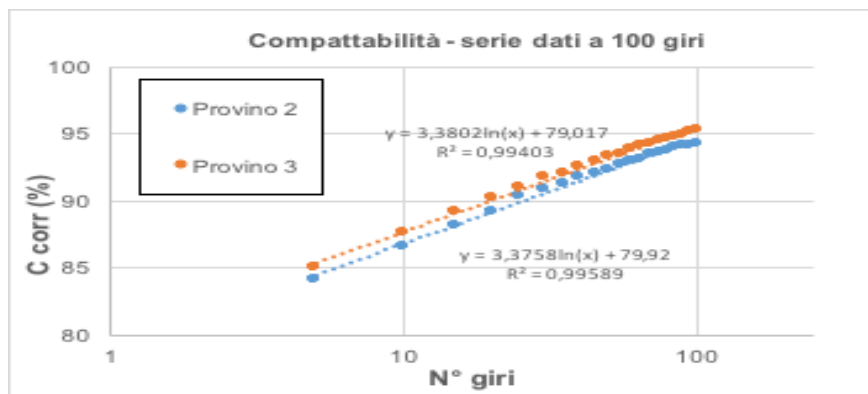
Provino 2 (a 180 giri)		
M1=	2271,6	g
M2=	1314,1	g
M3=	1315,3	g
M4=	2286,0	g
h =	57	mm
d =	150	mm
T _w	19,1	°C
ρ _w =	0,99846	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,369	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,337	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,255	g/cm ³

Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2270,3	g
M2=	1316,2	g
M3=	1317,1	g
M4=	2276,6	g
h =	57	mm
d =	150	mm
T _w	19,1	°C
ρ _w =	0,99846	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,376	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,362	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,254	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	3,22	%
Vuoti _{SSD} =	4,27	%
Vuoti _{geom} =	6,80	%

Vuoti _{dry} =	2,95	%
Vuoti _{SSD} =	4,27	%
Vuoti _{geom} =	7,60	%

Vuoti _{dry} =	2,66	%
Vuoti _{SSD} =	3,21	%
Vuoti _{geom} =	7,66	%



MISCELA C2-20-4.1 ($\rho_{max} = 2.441$)

Provino 1 (a 100 giri)		
M1=	2270,5	g
M2=	1311,2	g
M3=	1313,4	g
M4=	2287,0	g
h =	57,3	mm
d =	150	mm
T _w	19,6	°C
ρ _w =	0,99836	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,363	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,328	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,242	g/cm ³

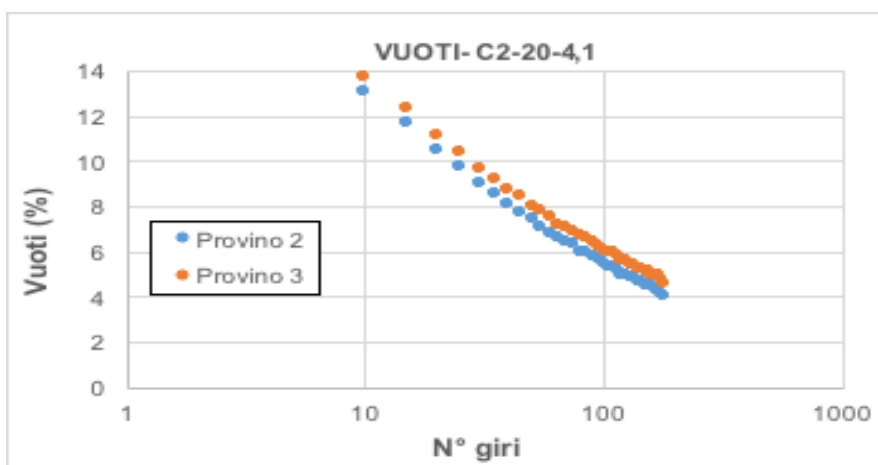
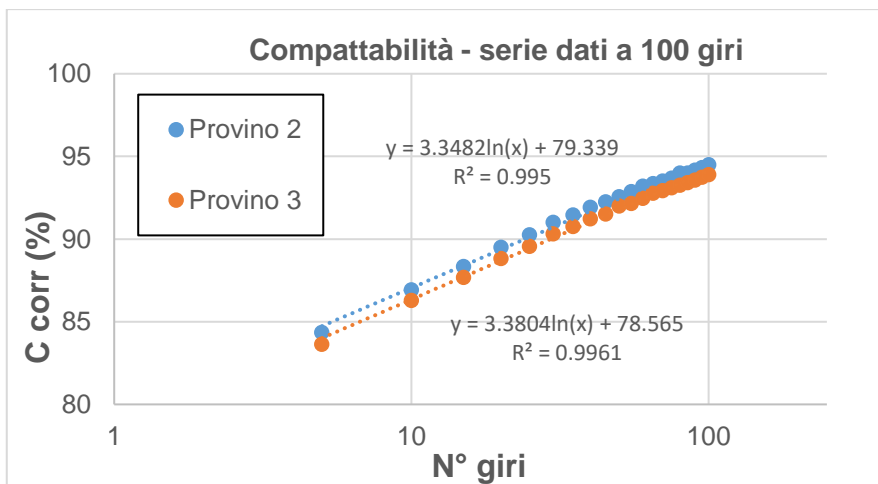
Provino 2 (a 180 giri)		
M1=	2271,8	g
M2=	1313,7	g
M3=	1314,9	g
M4=	2282,8	g
h =	56,6	mm
d =	150	mm
T _w	19,6	°C
ρ _w =	0,99836	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,367	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,343	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,271	g/cm ³

Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2268,5	g
M2=	1310,4	g
M3=	1311,3	g
M4=	2284,0	g
h =	56,9	mm
d =	150	mm
T _w	19,6	°C
ρ _w =	0,99836	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,364	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,328	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,256	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	3,19	%
Vuoti _{SSD} =	4,61	%
Vuoti _{geom} =	8,13	%

Vuoti _{dry} =	3,01	%
Vuoti _{SSD} =	3,99	%
Vuoti _{geom} =	6,94	%

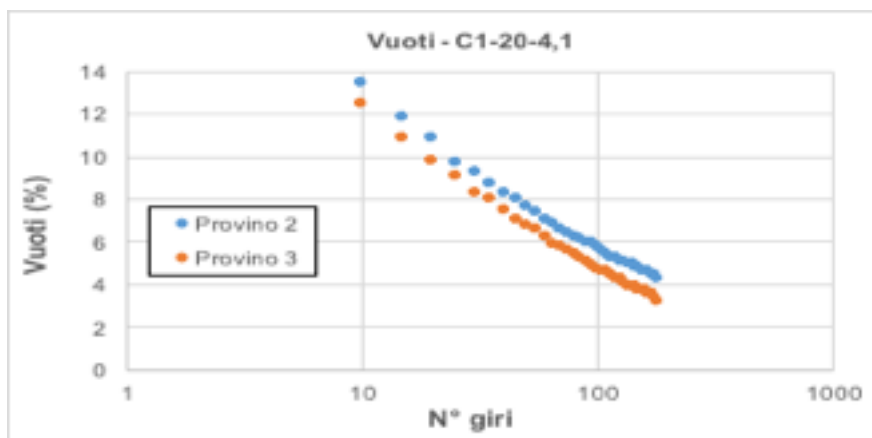
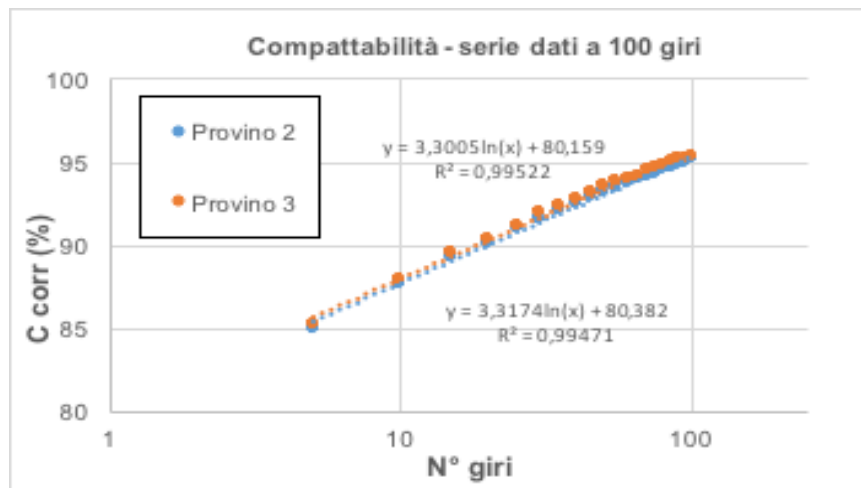
Vuoti _{dry} =	3,15	%
Vuoti _{SSD} =	4,61	%
Vuoti _{geom} =	7,57	%



MISCELA C1-20-4.3 ($\rho_{max} = 2.434$)

Provino 1 (a 100 giri)			Provino 2 (a 180 giri)			Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2267,4	g	M1=	2268,8	g	M1=	2270,3	g
M2=	1307,3	g	M2=	1315,6	g	M2=	1312,9	g
M3=	1309,2	g	M3=	1316,3	g	M3=	1313,9	g
M4=	2282,3	g	M4=	2278,8	g	M4=	2275,0	g
h =	57	mm	h =	56,4	mm	h =	56,1	mm
d =	150	mm	d =	150	mm	d =	150	mm
T _w	19,4	°C	T _w	19,4	°C	T _w	19,4	°C
ρ _w	0,99840	g/cm ³	ρ _w	0,99840	g/cm ³	ρ _w	0,99840	g/cm ³
ρ _{dry}	2,358	g/cm ³	ρ _{dry}	2,376	g/cm ³	ρ _{dry}	2,368	g/cm ³
ρ _{SSD}	2,326	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,353	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,358	g/cm ³
ρ _{geom}	2,251	g/cm ³	ρ _{geom}	2,276	g/cm ³	ρ _{geom}	2,290	g/cm ³

Vuoti _{dry}	3,15	%	Vuoti _{dry}	2,39	%	Vuoti _{dry}	2,75	%
Vuoti _{SSD}	4,44	%	Vuoti _{SSD}	3,33	%	Vuoti _{SSD}	3,12	%
Vuoti _{geom}	7,53	%	Vuoti _{geom}	6,49	%	Vuoti _{geom}	5,93	%



MISCELA C2-20-4.3 ($\rho_{max} = 2.434$)

Provino 1 (a 100 giri)			Provino 2 (a 180 giri)		
M1=	2271,3	g	M1=	2271,2	g
M2=	1310	g	M2=	1315,9	g
M3=	1312,2	g	M3=	1317,0	g
M4=	2299,6	g	M4=	2283,5	g
h =	58,4	mm	h =	57,2	mm
d =	150	mm	d =	150	mm
T _w	21,0	°C	T _w	21,0	°C
ρ _w =	0,99807	g/cm ³	ρ _w =	0,99807	g/cm ³

Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2271,2	g
M2=	1318,1	g
M3=	1320,3	g
M4=	2282,5	g
h =	57,1	mm
d =	150	mm
T _w	21,0	°C
ρ _w =	0,99807	g/cm ³

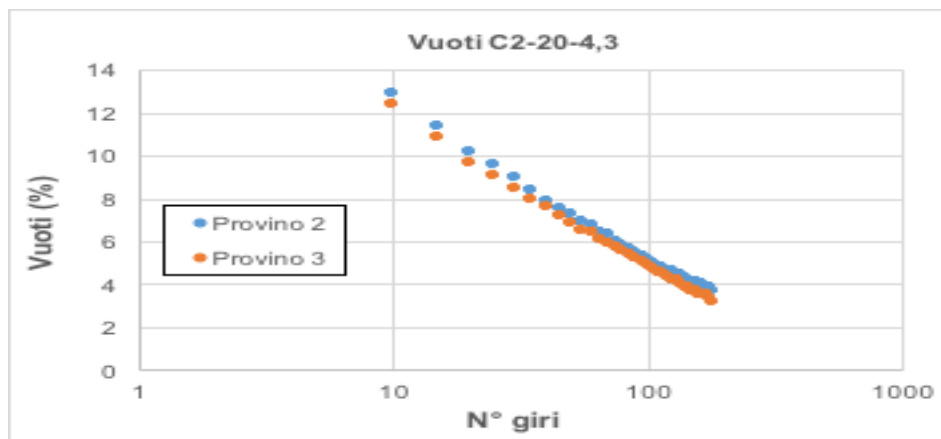
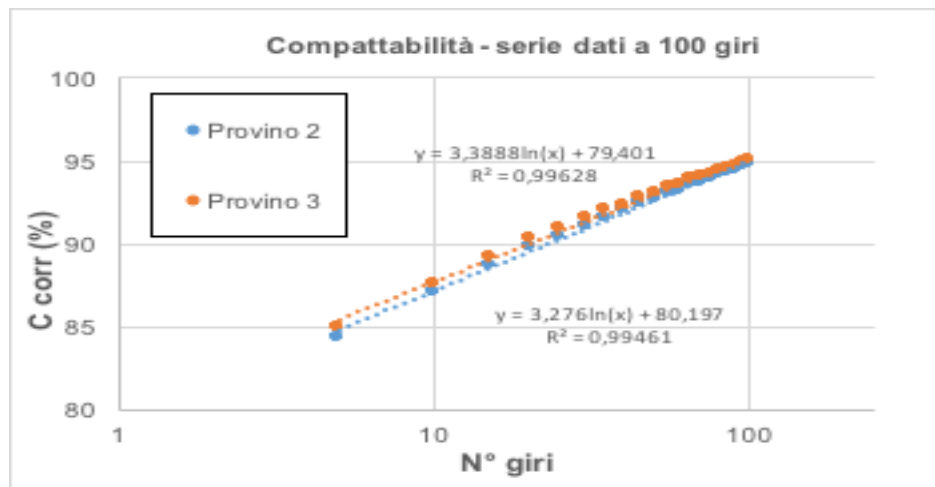
ρ _{dry} =	2,358	g/cm ³	ρ _{dry} =	2,373	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,296	g/cm ³	ρ _{SSD} =	2,345	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,201	g/cm ³	ρ _{geom} =	2,247	g/cm ³

ρ _{dry} =	2,378	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,356	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,251	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	3,13	%
Vuoti _{SSD} =	5,69	%
Vuoti _{geom} =	9,60	%

Vuoti _{dry} =	2,53	%
Vuoti _{SSD} =	3,66	%
Vuoti _{geom} =	7,70	%

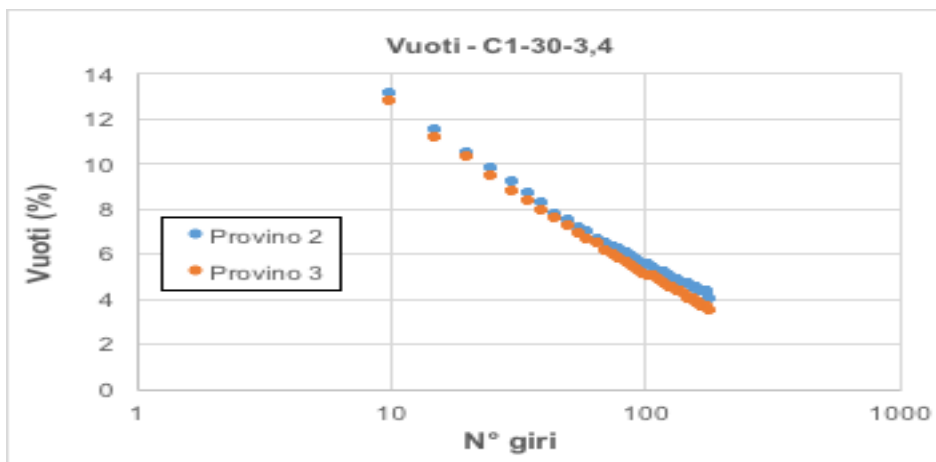
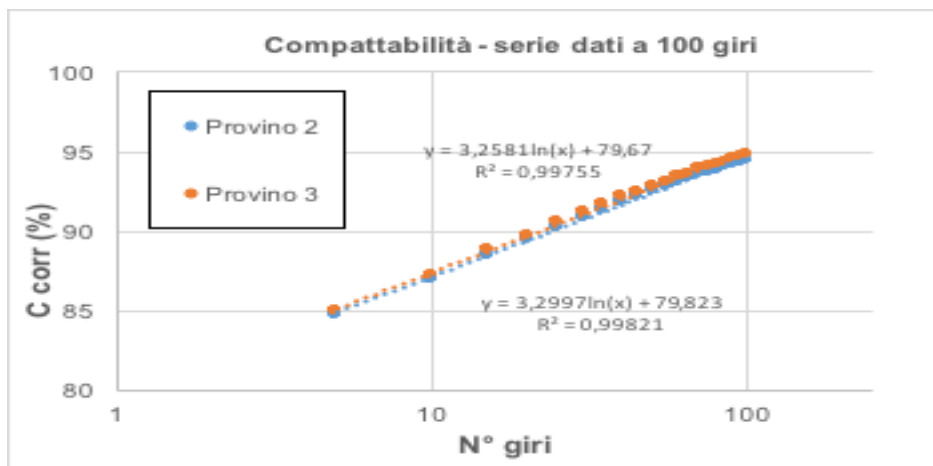
Vuoti _{dry} =	2,30	%
Vuoti _{SSD} =	3,23	%
Vuoti _{geom} =	7,54	%



MISCELA C1-30-3.4 ($\rho_{max} = 2.438$)

Provino 1 (a 100 giri)			Provino 2 (a 180 giri)			Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2270,4	g	M1=	2269,1	g	M1=	2269,5	g
M2=	1314,2	g	M2=	1314,4	g	M2=	1315,3	g
M3=	1315,4	g	M3=	1315,2	g	M3=	1319,7	g
M4=	2289,2	g	M4=	2283,5	g	M4=	2282,6	g
h =	57,2	mm	h =	56,4	mm	h =	56,2	mm
d =	150	mm	d =	150	mm	d =	150	mm
T _w	18,1	°C	T _w	18,1	°C	T _w	18,1	°C
ρ _w	0,99865	g/cm ³	ρ _w	0,99865	g/cm ³	ρ _w	0,99865	g/cm ³
ρ _{dry}	2,371	g/cm ³	ρ _{dry}	2,374	g/cm ³	ρ _{dry}	2,375	g/cm ³
ρ _{SSD}	2,328	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,340	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,354	g/cm ³
ρ _{geom}	2,246	g/cm ³	ρ _{geom}	2,277	g/cm ³	ρ _{geom}	2,285	g/cm ³

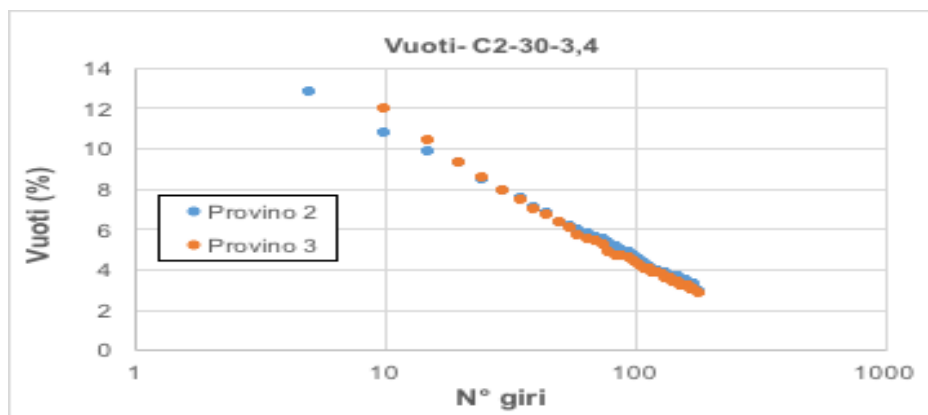
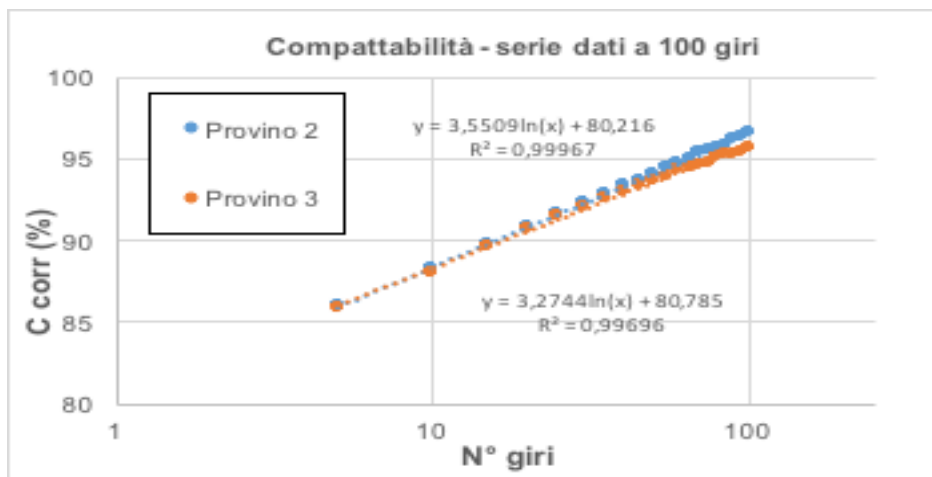
Vuoti _{dry}	2,72	%	Vuoti _{dry}	2,63	%	Vuoti _{dry}	2,56	%
Vuoti _{SSD}	4,48	%	Vuoti _{SSD}	3,99	%	Vuoti _{SSD}	3,44	%
Vuoti _{geom}	7,85	%	Vuoti _{geom}	6,60	%	Vuoti _{geom}	6,25	%



MISCELA C2-30-4.3 ($\rho_{max} = 2.438$)

Provino 1 (a 100 giri)			Provino 2 (a 180 giri)			Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2272,7	g	M1=	2271,7	g	M1=	2270,6	g
M2=	1312,7	g	M2=	1322,2	g	M2=	1323,3	g
M3=	1314,4	g	M3=	1323,7	g	M3=	1324,3	g
M4=	2287,7	g	M4=	2282,3	g	M4=	2281,5	g
h =	57,2	mm	h =	57,2	mm	h =	56,1	mm
d =	150	mm	d =	150	mm	d =	150	mm
T _w	18,1	°C	T _w	18,1	°C	T _w	18,1	°C
ρ _w =	0,99865	g/cm ³	ρ _w =	0,99865	g/cm ³	ρ _w =	0,99865	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,364	g/cm ³	ρ _{dry} =	2,389	g/cm ³	ρ _{dry} =	2,394	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,332	g/cm ³	ρ _{SSD} =	2,367	g/cm ³	ρ _{SSD} =	2,369	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,248	g/cm ³	ρ _{geom} =	2,247	g/cm ³	ρ _{geom} =	2,290	g/cm ³

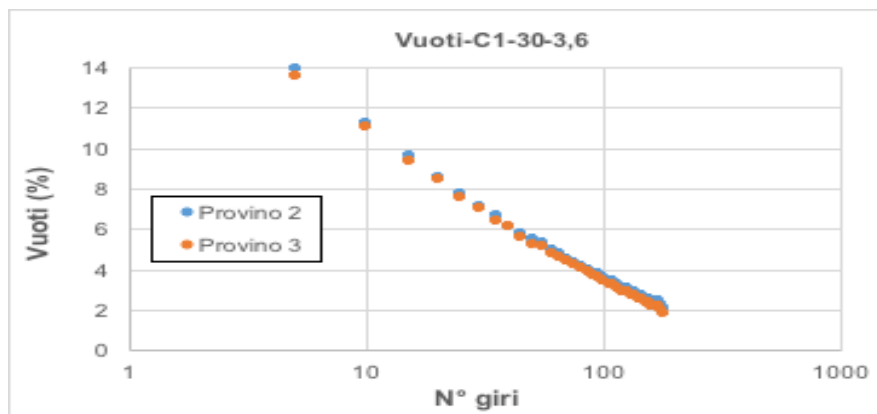
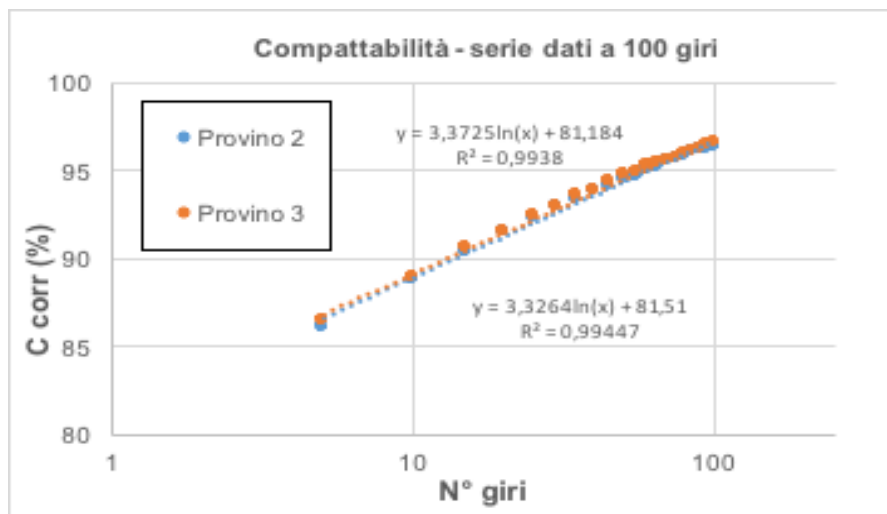
Vuoti _{dry} =	3,01	%	Vuoti _{dry} =	1,98	%	Vuoti _{dry} =	1,80	%
Vuoti _{SSD} =	4,34	%	Vuoti _{SSD} =	2,91	%	Vuoti _{SSD} =	2,82	%
Vuoti _{geom} =	7,76	%	Vuoti _{geom} =	7,80	%	Vuoti _{geom} =	6,04	%



MISCELA C1-30-3.6 ($\rho_{max} = 2.431$)

Provino 1 (a 100 giri)			Provino 2 (a 180 giri)			Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2270,6	g	M1=	2257,6	g	M1=	2271,6	g
M2=	1311,8	g	M2=	1315,9	g	M2=	1324,3	g
M3=	1313,1	g	M3=	1316,6	g	M3=	1325,4	g
M4=	2280,8	g	M4=	2263,2	g	M4=	2275,7	g
h =	56,7	mm	h =	55,2	mm	h =	55,2	mm
d =	150	mm	d =	150	mm	d =	150	mm
T _w	18,0	°C	T _w	18,0	°C	T _w	18,0	°C
ρ _w	0,99866	g/cm ³	ρ _w	0,99866	g/cm ³	ρ _w	0,99866	g/cm ³
ρ _{dry}	2,365	g/cm ³	ρ _{dry}	2,394	g/cm ³	ρ _{dry}	2,395	g/cm ³
ρ _{SSD}	2,343	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,382	g/cm ³	ρ _{SSD}	2,387	g/cm ³
ρ _{geom}	2,266	g/cm ³	ρ _{geom}	2,314	g/cm ³	ρ _{geom}	2,329	g/cm ³

Vuoti _{dry}	2,73	%	Vuoti _{dry}	1,53	%	Vuoti _{dry}	1,50	%
Vuoti _{SSD}	3,62	%	Vuoti _{SSD}	2,04	%	Vuoti _{SSD}	1,81	%
Vuoti _{geom}	6,79	%	Vuoti _{geom}	4,81	%	Vuoti _{geom}	4,22	%



MISCELA C2-30-3.6 ($\rho_{max} = 2.431$)

Provino 1 (a 100 giri)		
M1=	2270,1	g
M2=	1313,8	g
M3=	1314,3	g
M4=	2282,8	g
h =	58,2	mm
d =	150	mm
T _w	18,0	°C
ρ _w =	0,99866	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,371	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,341	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,207	g/cm ³

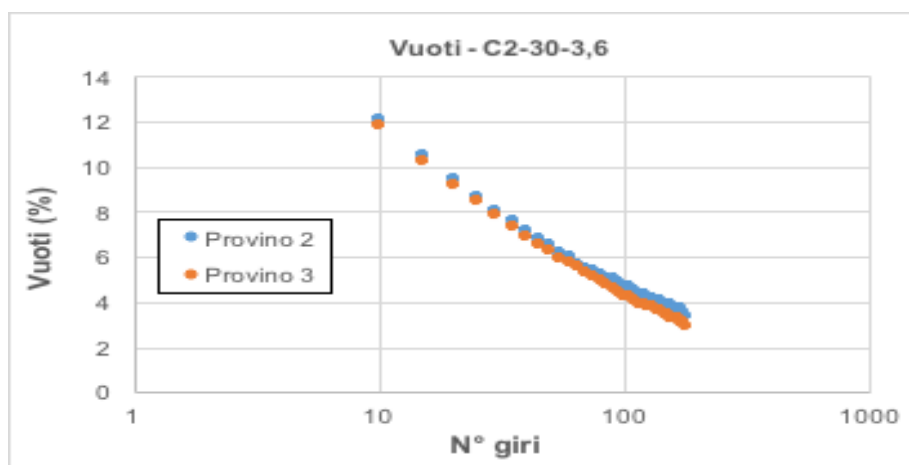
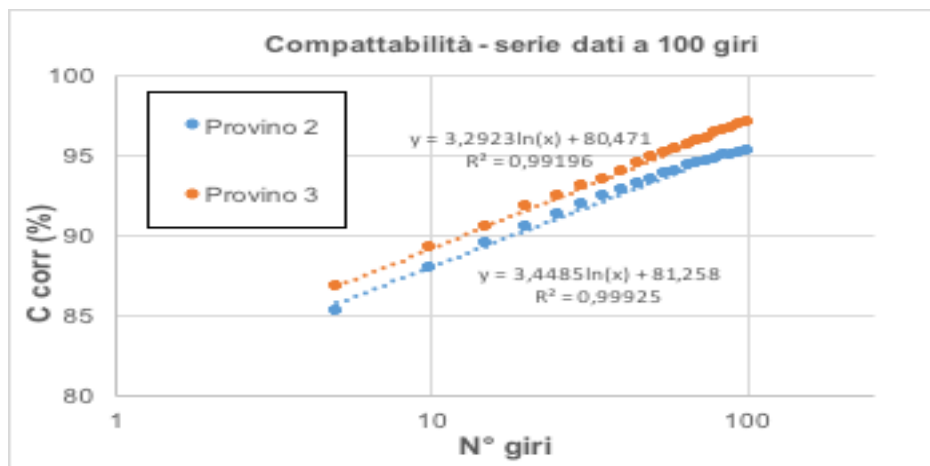
Provino 2 (a 180 giri)		
M1=	2271,0	g
M2=	1315,1	g
M3=	1318,2	g
M4=	2283,4	g
h =	57,2	mm
d =	150	mm
T _w	18,0	°C
ρ _w =	0,99866	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,373	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,350	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,247	g/cm ³

Provino 3 (a 180 giri)		
M1=	2271,9	g
M2=	1318,6	g
M3=	1318,7	g
M4=	2279,9	g
h =	57,3	mm
d =	150	mm
T _w	18,0	°C
ρ _w =	0,99866	g/cm ³
ρ _{dry} =	2,380	g/cm ³
ρ _{SSD} =	2,360	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,244	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	2,49	%
Vuoti _{SSD} =	3,72	%
Vuoti _{geom} =	9,21	%

Vuoti _{dry} =	2,41	%
Vuoti _{SSD} =	3,35	%
Vuoti _{geom} =	7,59	%

Vuoti _{dry} =	2,11	%
Vuoti _{SSD} =	2,91	%
Vuoti _{geom} =	7,72	%



5.2 TRAZIONE INDIRECTA

Per il calcolo della resistenza a trazione indiretta (ITS) e del coefficiente di trazione indiretta (CTI) a 25°C, si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 12697-23, invece per lo studio eseguito sulla suscettività all'acqua (ITSR) ci si è riferiti alla UNI EN 12697-12:

Resistenza a trazione indiretta:

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * h}$$

ITS = resistenza a trazione indiretta (MPa)

P = carico a rottura (N)

D = diametro provino (mm)

h = altezza media provino (mm)

Coefficiente di trazione indiretta:

$$CTI = \frac{\pi * ITS * D}{2 * \delta_c}$$

CTI = coefficiente di trazione indiretta (MPa)

δ_c = deformazione verticale (mm)

Indirect Tensile Strength Ratio:

$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100$$

ITSR = Indirect Tensile Strength Ratio (%)

ITS_{wet} = resistenza media a trazione indiretta su serie di provini condizionati in acqua (MPa)

ITS_{dry} = resistenza media a trazione indiretta su serie di provini asciutti (MPa)

Nelle tabelle successive sono indicate le dimensioni del provino, la tipologia di condizionamento a cui stato sottoposto (Dry o Wet), i vuoti (attraverso metodo geometrico o metodo dry) ed infine tutti i parametri restituiti dalla prova eseguita.

Miscela C Riferimento							
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58,3	58,2	58,4	58,3	58,5	55,5
Diametro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuot _{dry}	%	3,4	4,2	3,6	2,9	3,3	1,9
Vuot _{geom}	%	9,9	9,7	10,0	9,8	10,1	5,0
δ_c / D	-	0,02010	0,01770	0,02047	0,01590	0,01675	0,02268
P	KN	19,4	19,9	20,4	20,8	20,3	20,3
ITS	Mpa	1,410	1,454	1,480	1,517	1,472	1,550
CTI	Mpa	110,2	129,0	113,6	149,9	138,0	107,4
ITS _{dry}	Mpa	1,48					
CTL _{dry} (medio)	Mpa	139,0					
ITS _{wet}	Mpa	1,48					
ITSR	%	99,9					

Miscela C1-30-3,4							
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58,5	58,7	58,8	59,3	58,8	58,5
Diámetro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuot _{dry}	%	4,4	4,4	4,7	4,7	4,6	4,5
Vuot _{geom}	%	9,9	10,1	10,3	11,1	10,3	9,9
δ_c / D	-	0,01964	0,02181	0,01906	0,02025	0,01871	0,01994
P	KN	17,6	19,1	17,0	16,5	18,1	15,9
ITS	Mpa	1,276	1,377	1,230	1,179	1,304	1,156
CTI	Mpa	102,0	99,2	101,4	91,5	109,5	91,1
ITS _{dry}	Mpa	1,29					
CT _{dry} (medio)	Mpa	100,0					
ITS _{wet}	Mpa	1,22					
ITSR	%	94,9					

Miscela C2-30-3,4							
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	59,4	58,6	59	58,6	59	59
Diámetro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuot _{dry}	%	4,7	4,3	5,0	4,7	4,9	5,2
Vuot _{geom}	%	11,2	10,0	10,6	10,0	10,6	10,6
δ_c / D	-	0,02195	0,02003	0,01991	0,02104	0,02089	0,02011
P	KN	16,0	18,3	17,5	19,4	18,3	15,0
ITS	Mpa	1,145	1,329	1,259	1,401	1,319	1,077
CTI	Mpa	82,0	104,2	99,3	104,6	99,2	84,1
ITS _{dry}	Mpa	1,35					
CT _{dry} (medio)	Mpa	102,7					
ITS _{wet}	Mpa	1,16					
ITSR	%	86,0					

Miscela C1-30-3,6							
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	57,4	58,3	57,8	57,4	57,4	58,3
Diametro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuot _{dry}	%	3,2	3,5	3,5	3,3	3,8	4,0
Vuot _{geom}	%	7,9	9,3	8,5	7,9	8,7	9,3
δ_c / D	-	0,01778	0,01921	0,02136	0,01839	0,01968	0,02060
P	KN	22,8	19,7	20,4	21,3	19,9	19,8
ITS	Mpa	1,685	1,431	1,499	1,576	1,473	1,443
CTI	Mpa	148,9	117,0	110,3	134,6	117,6	110,1
ITS _{dry}	Mpa	1,49					
CTI _{dry} (medio)	Mpa	123,1					
ITS _{wet}	Mpa	1,54					
ITSR	%	103,3					

Miscela C2-30-3,6							
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58,5	58,2	57,7	57,5	58,1	58,3
Diametro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuot _{dry}	%	3,8	3,0	3,5	3,6	3,9	4,6
Vuot _{geom}	%	9,7	9,2	8,4	8,1	9,1	9,4
δ_c / D	-	0,02105	0,02049	0,02352	0,02097	0,02179	0,02428
P	KN	20,4	20,1	21,4	21,5	18,8	19,8
ITS	Mpa	1,480	1,464	1,572	1,588	1,373	1,444
CTI	Mpa	110,4	112,2	105,0	118,9	99,0	93,4
ITS _{dry}	Mpa	1,48					
CTI _{dry} (medio)	Mpa	110,0					
ITS _{wet}	Mpa	1,50					
ITSR	%	101,6					

Miscela C1-20-4,1

	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58,2	58,3	58,8	58,9	58,9	58,5
Diámetro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuoti _{dry}	%	4,2	4,4	4,4	4,8	4,1	5,3
Vuoti _{geom}	%	9,5	9,7	10,5	10,6	10,6	10,0
δ_c / D	-	0,02476	0,02454	0,02293	0,02066	0,02214	0,03234
P	KN	17,2	17,4	14,7	14,7	15,3	16,3
ITS	Mpa	1,251	1,268	1,063	1,060	1,103	1,186
CTI	Mpa	79,4	81,2	72,8	80,6	78,3	57,6
ITS _{dry}	Mpa	1,14					
CTI _{dry} (medio)	Mpa	80,0					
ITS _{wet}	Mpa	1,17					
ITSR	%	102,0					

Miscela C2-20-4,1

	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58,3	57,8	58,3	59,4	59,9	59,3
Diámetro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuoti _{dry}	%	4,5	3,7	4,2	4,2	4,2	5,2
Vuoti _{geom}	%	9,5	8,9	9,7	11,4	12,1	11,2
δ_c / D	-	0,02613	0,02677	0,02548	0,02421	0,02134	0,02972
P	KN	16,1	17,9	16,1	14,9	14,4	13,0
ITS	Mpa	1,172	1,312	1,170	1,068	1,021	0,932
CTI	Mpa	70,5	77,0	72,1	69,3	75,2	49,3
ITS _{dry}	Mpa	1,13					
CTI _{dry} (medio)	Mpa	73,8					
ITS _{wet}	Mpa	1,09					
ITSR	%	96,3					

Miscela C1-20-4,3

	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58	58,8	59,1	59,4	58,9	59,2
Diámetro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuoti _{dry}	%	3,6	3,7	4,0	4,6	4,4	4,5
Vuoti _{geom}	%	9,0	10,3	10,7	11,2	10,5	10,9
δ_c / D	-	0,02297	0,02446	0,02341	0,01835	0,02239	0,02026
P	KN	16,8	16,2	13,7	14,3	14,6	13,2
ITS	Mpa	1,229	1,169	0,987	1,021	1,049	0,947
CTI	Mpa	84,0	75,1	66,2	87,4	73,6	73,4
ITS _{dry}	Mpa	1,08					
CTI _{dry} (medio)	Mpa	78,7					
ITS _{wet}	Mpa	1,05					
ITSR	%	97,7					

Miscela C2-20-4,3

	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	58,4	58	58,3	59,4	57,8	58,4
Diámetro	mm	150	150	150	150	150	150
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuoti _{dry}	%	3,6	3,7	3,8	4,0	4,2	4,3
Vuoti _{geom}	%	9,6	9,0	9,5	11,2	8,7	9,7
δ_c / D	-	0,02105	0,02258	0,02191	0,02118	0,02466	0,02155
P	KN	15,2	17,6	16,7	15,8	18,6	17,3
ITS	Mpa	1,104	1,291	1,217	1,126	1,362	1,255
CTI	Mpa	82,4	89,8	87,2	83,5	86,8	91,5
ITS _{dry}	Mpa	1,26					
CTI _{dry} (medio)	Mpa	86,7					
ITS _{wet}	Mpa	1,19					
ITSR	%	94,6					

5.3 RIEPILOGO

A partire dai dati ottenuti dalle prove di addensamento e trazione indiretta effettuate, è stato possibile costruire degli istogrammi riepilogativi in grado di stabilire un confronto immediato e facilmente leggibile tra le diverse miscele confezionate con i limiti imposti dal Capitolato della provincia di Macerata (MC).

- Contenuto vuoti residui in relazione al numero di giri (Fig. 5.1).

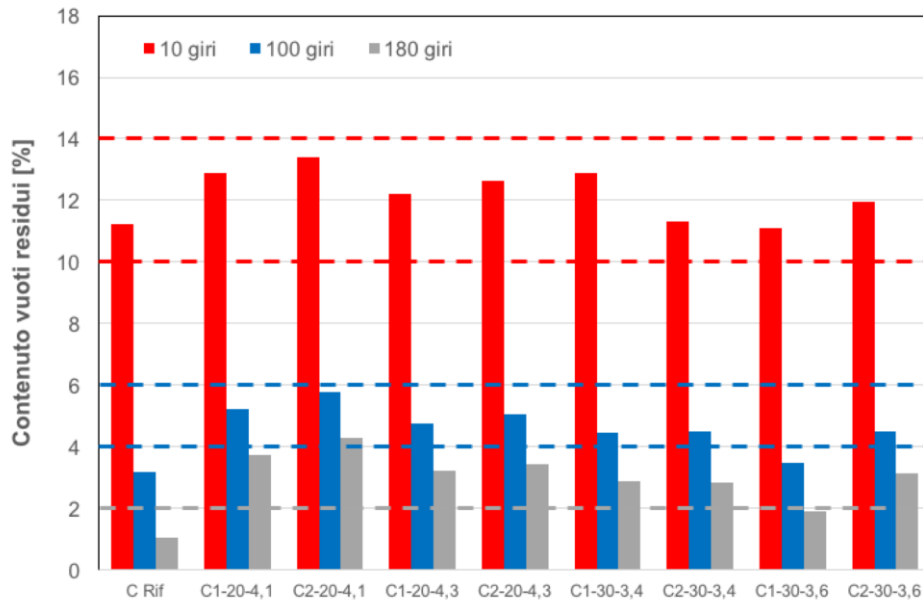


Figura 5.1

- Coefficiente angolare medio (K) della retta di compattabilità che fornisce la lavorabilità della miscela (Fig. 5.2).

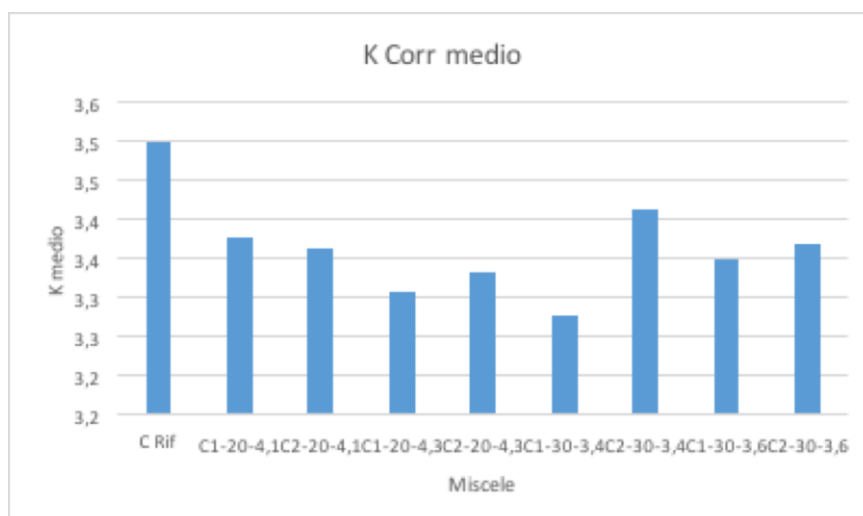


Figura 5.2

- Valori medi della resistenza a trazione indiretta (ITS) in condizioni dry o wet (Fig. 5.3)

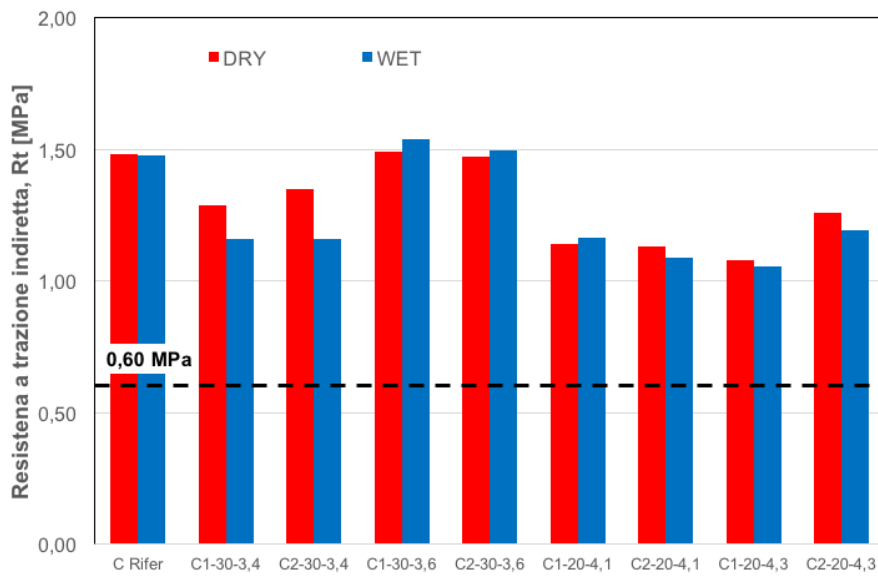


Figura 5.3

- Coefficiente di trazione indiretta (CTI) medio delle miscele (Fig. 5.4)

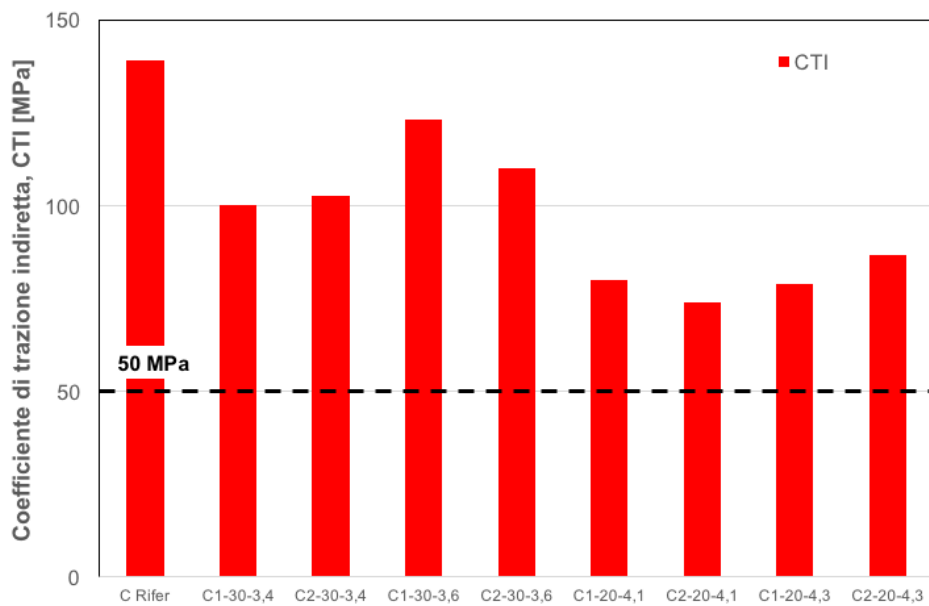


Figura 5

- Valori medi relativi alla suscettività all'acqua dei provini (Fig. 5.5)

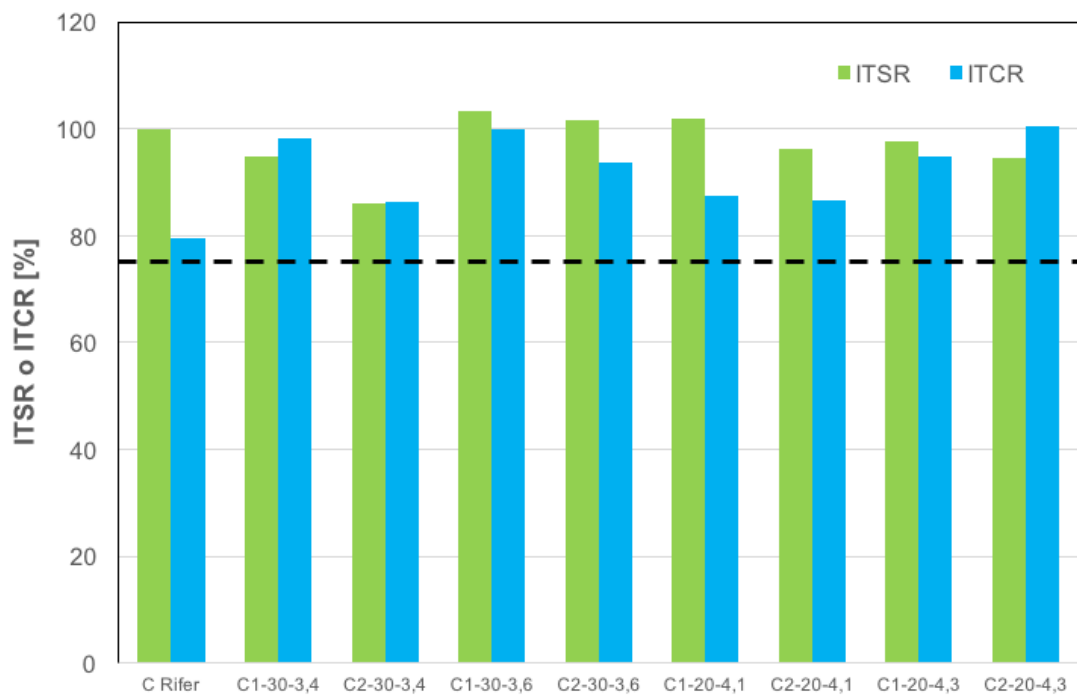


Figura 5.5

6. CONCLUSIONI

L'indagine sperimentale condotta su miscele riciclate con tecnologie tiepide si è concentrata sull'efficacia conferita alla miscela dall'aggiunta delle due tipologie di additivo, del diverso quantitativo di bitume e sulla differente percentuale di fresato stradale inserito.

Analizzando in dettaglio ogni caratteristica meccanica e volumetrica fornita dalle prove di compattabilità e trazione indiretta, a cui sono stati sottoposti i campioni in esame, è stato possibile confrontare la miscela riciclata a caldo con le otto confezionate con tecnologie tiepide (WMA), scegliendo tra quest'ultime quelle che rispettassero gli standard previsti dal Capitolato della provincia di Macerata.

Pertanto, si sono dedotte le seguenti conclusioni:

- Il grado di addensamento e la lavorabilità della miscela esplicano la facilità con cui essa viene stesa in cantiere; nei campioni di WARM si è visto come la presenza di fresato abbia ridotto la compattabilità, ma grazie all'utilizzo dei due additivi si è potuto constatare un buon miglioramento a temperature più basse.
- Lo studio sulla resistenza dei provini riciclati a tiepido, svoltasi tramite la prova di trazione indiretta, ha evidenziato un aumento di rigidità in seguito all'aggiunta di fresato stradale nelle miscele.

Dunque, osservando gli istogrammi riepilogativi del capitolo precedente, tra le otto miscele riciclate a tiepido sono state scelte:

- C2-20-4.1
- C2-30-3.4

Dai risultati ottenuti sulla compattabilità, si può notare come l'additivo di tipo 1 permetta un addensamento migliore rispetto all'additivo 2 a parità di temperature di compattazione. Le percentuali di fresato e bitume aggiunti alla miscela WARM, influenzano invece la lavorabilità e i vuoti residui; sono dunque state scelte delle miscele che ottimizzassero al meglio i due parametri.

Per la prova di trazione indiretta, i provini sono stati condizionati in aria (dry) e in acqua (wet), le due miscele scelte alla fine dello studio condotto non hanno risentito in maniera particolare del condizionamento all'acqua per 15 giorni, riportando infatti valori di ITS simili.

Si è infine constatato come un aumento della percentuale di fresato e una diminuzione del quantitativo di bitume portassero ad un discreto aumento di rigidità.

Bibliografia

- Felice A. Santagata, "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol.1 e 2
- Prof. Fabrizio Cardone, Materiale didattico, Ancona
- Prof. Francesco Canestrari, Materiale Didattico, Ancona
- [www.europarl.europa.eu/economia circolare- definizione-importanza-e-vantaggi](http://www.europarl.europa.eu/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi)