Sommario

1.INTRODUZIONE	2
2.INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	4
2.1 ECONOMIA CIRCOLARE	4
2.2 RICICLAGGIO NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI	5
2.3 LE TECNICHE INNOVATIVE- CONGLOMERATI WMA	7
3. MATERIALI E MACCHINARI	10
3.1 AGGREGATI	10
3.2 FRESATO STRADALE	15
3.3 BITUME	19
3.4 ADDITIVI	20
3.5 MISCELATRICE	22
3.6 PRESSA GIRATORIA	29
3.7 TRAZIONE INDIRETTA	32
4.PROGRAMMA SPERIMENTALE	36
4.1 PREPARAZIONE MISCELE	36
4.2 RICETTE E FUSI PER IL CONFEZZIONAMENTO DELLE MISCELE	40
4.2 MASSA VOLUMICA DEL PROVINO	
5. RISULTATI PROVE	49
5.1 GRADO DI ADDENSAMENTO	50
5.2 TRAZIONE INDIRETTA	60
5.3 RIEPILOGO	64
6.CONCLUSIONI	67
BIBLIOGRAFIA	69

1.INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è rivolta l'attenzione alla tutela ambientale e alla salvaguardia dei beni a disposizione, portando nuove ricerche e sperimentazioni in tutti i campi.

Nell'ambito dell'ingegneria civile sono state studiate nuove tecnologie finalizzate a ridurre le emissioni in atmosfera e consumo delle materie prime, senza diminuire le prestazioni in esercizio delle pavimentazioni stradali.

In questa tesi, lo scopo dello studio condotto sullo strato di Binder 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 alcuni parametri aggiunti: percentuale di fresato, quantitativo di bitume aggiunto e tipologia di additivo chimico utilizzato.

L'analisi sperimentale è stata richiesta da un impianto di produzione con proprie miscele al fine di ottimizzare quest'ultime con tecnologie WMA. La sperimentazione è stata descritta nei seguenti capitoli:

- ➤ CAPITOLO 2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA: vi è descritto il significato e i principi dell'economia circolare, il riciclaggio delle pavimentazioni stradali e le innovative tecniche di riciclaggio a tiepido WMA.
- ➤ CAPITOLO 3 MATERIALI E MACCHINARI: si elencano tutti i materiali (aggregati, bitume, additivi) utilizzati, spiegandone le prove di caratterizzazione effettuate su di esse, inoltre elencati i diversi macchinari utilizzati (miscelatore, pressa giratoria, trazione indiretta) con i rispettivi funzionamenti.
- ➤ CAPITOLO 4 PROGRAMMA SPERIMENTALE: elenca il procedimento seguito per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso, il procedimento per la determinazione delle masse volumiche.

- > CAPITOLO 5 RISULTATI PROVE: si mette in evidenza i risultati acquisiti in relazione agli obiettivi prefissati all'inizio della sperimentazione.
- ➤ CAPITO 6 CONCLUSIONI: commenti dei risultati ottenuti dalle prove meccaniche e volumetriche delle diverse miscele, motivando la scelta delle determinate miscele rispetto ad altre.

2.INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

2.1 ECONOMIA CIRCOLARE

Ci troviamo di fronte ad un aumento della domanda di materie prime e allo stesso tempo a una scarsità delle risorse: molte delle materie prime e delle risorse essenziali per l'economia sono limitate ma la popolazione mondiale continua a crescere e di conseguenza aumenta anche la richiesta di tali risorse finite. I processi di estrazione di queste materie prime hanno un forte impatto sull'ambiente e aumentano il consumo di energia e produzione di anidride carbonica (CO2). Usare con moderazione queste materie prime può contribuire alla diminuzione delle emissioni di CO2.

L'economia circolare è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile (*Figura 2.1*). In questo modo si estende il ciclo di vita dei prodotti, contribuendo a ridurre i rifiuti al minimo. Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all'interno del ciclo produttivo generando ulteriore valore.

I principi dell'economia circolare vanno in contrasto con il modello economico tradizionale, fondato invece sul tipico schema "estrarre, produrre, utilizzare e gettare". Il modello economico tradizionale dipende dalla disponibilità di grandi quantità di materiali e energia facilmente reperibili e a basso prezzo.

La transizione verso un'economia più circolare può portare numerosi vantaggi, tra cui:

- Riduzione della pressione sull'ambiente
- Più sicurezza circa la disponibilità di materie prime
- Impulso all'innovazione e alla crescita economica
- Incremento dell'occupazione



Figura 2.1: Economia circolare

2.2 RICICLAGGIO NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

L'economia circolare un modello di produzione innovativo, nell'ambito stradale può essere attuata attraverso il riciclaggio delle pavimentazioni stradali.

Negli ultimi anni si sta assistendo ad un progresso sempre più rapido della società, nell'ambito stradale comporta un aumento del traffico e dei carichi che agiscono sulle pavimentazioni stradali portandole al degrado.

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali consiste nel distruggere gli strati legati delle pavimentazioni degradate, con questa operazione si produce fresato stradale, aggregato rivestito da bitume.

Il fresato può essere impiegato con due differenti tecniche di riciclaggio:

- Riciclaggio a caldo
- Riciclaggio a freddo

Nella tecnica di riciclaggio a caldo, la procedura di confezionamento del conglomerato bituminoso prevede una fase di riscaldamento degli inerti oltre i 150°C può essere fatto "in situ" o in impianto.

Il riciclaggio "in situ" del conglomerato bituminoso tutte le operazioni si sviluppano in cantiere. Ciò compota il vantaggio di evitare il trasporto e lo stoccaggio del materiale recuperato, ma anche lo svantaggio di utilizzare machine da cantiere più complesse e costose.

Nel riciclaggio in impianto il fresato stradale viene aggiunto direttamente alla miscela di aggregati vergini, bitume ed eventuali additivi nell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso. La tecnica in impanto conferisce prestazioni più elevate al conglomerato riciclato, rendendolo idoneo per tutti gli strati legati della pavimentazione.

La tecnica di riciclaggio a freddo consiste nell'utilizzo del fresato stradale e di aggregati lapidei di primo impiego senza una fase preventiva di riscaldamento, ma miscelandoli con il legante a temperatura ambiente. Il riciclaggio a freddo presenta numerosi vantaggi:

- Limita l'utilizzo delle materie prime come gli aggregati, riducendone le attività di estrazione;
- riduce i costi di produzione e di manutenzione;
- risparmio di energia per il riscaldamento degli aggregati;
- riduce l'impatto ambientale limitando i fumi emessi dal conbustibile bruciato;
- permette l'utilizzo di un'elevata quantità di fresato stradale (fino al 100% della massa degli aggregati).

2.3 LE TECNICHE INNOVATIVE- CONGLOMERATI WMA

Queste tecniche precendentemente elencate sono utilizzate in tutto il mondo, con la ricerca si è sviluppata una nuova tecnica che permette di abbassare la temperatura di produzione delle miscele limitando le emissioni e mantenendo buone le prestazioni.

La sperimentazione delle tecniche a tiepido sono state eseguite per la prima volta tra il 1995 e il 1999 in Germania e in Norvegia.

Con WMA (Warm Mix Asphalt, ossia Miscela Bituminosa Tiepida), si definisce il conglomerato bituminoso ottenuto, per l'appunto, da processi produttivi in cui le temperature operative risultano inferiori di decine di gradi rispetto a quelle delle produzioni a caldo, ma utilizzando gli stessi macchinari. Le tecniche WMA sono i risultati di una lunga ricerca, volta a ottimizzare le caratteristiche chimico-fisiche dei bitumi, ottenendo un legante che garantisca ottime prestazioni in fase produttiva, ma che possa assumere rapidamente caratteristiche meccaniche ottimali per sopportare gli sforzi dovuti al carico veicolare a cui una pavimentazione stradale è sottoposta. I vantaggi delle tecniche WMA possono essere:

- risparmio energetico, conseguente riduzione del consumo di combustibile, risorsa non rinnovabile (*Figura 2.2*);
- riduzione delle emissioni dovute alla combustione di carburanti, di fiumi e di odori sia in fase di produzione che in fase di stesa, diminuendo le temperature influenza la quantità di esmissioni e la qualità;
- miglioramento delle condizioni di lavoro per gli operatori del settore;
- riduzione dell'invecchiamento del bitume causato dalle alte temperature;
- riduzine dei tempi di attesa per la riapertura al traffico di tratti di pavimentazione appena messi in opera;
- minor usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo produttivo, derivante dall'abbattimento delle temperature;
- ampliamento dell'intervallo stagionale di messa in opera (si può stendere anche in pieno inverno e durante le ore notturne);

• possibilità di aumentare la distanza di trasporto, a parità di temperatura finale.

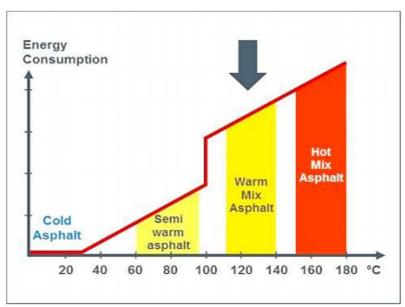


Figura 2.2: Consumo energetico

Un vantaggio altrettanto importante delle tecniche WMA, consiste nel poter inserire all'interno delle miscele più fresato (RAP) rispetto alle tecniche a caldo senza modificare la qualità della lavorazione (*Figura 2.3*), grazie all'uso degli additivi.

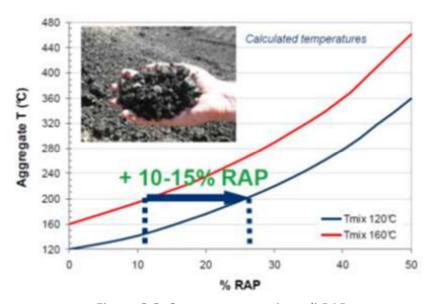


Figura 2.3: Contenuto maggiore di RAP

Le miscele WMA possono essere classificate in base alle tecniche di produzione:

- tecniche che prevedono l'aggiunta di additivi fluidificanti del bitume, che a loro volta sono divisi in organici (o cere) e chimici;
- tecniche schiumanti, di una parte o della totalità del legante stesso.

Gli svantaggi della tecnologia a tiepido sono ad esempio i costi iniziali per implementare questa tecnica, gli impianti devono adeguarsi ad un nuovo tipo di produzione. L'utilizzo di basse temperature porta il conglomerato bituminoso ad essere più suscettibile all'umidità, questa problematica deriva dalla non completa essiccazione dell'aggregato che può portare al fenomeno dello *stripping* (fenomeno di degrado dove il legame tra bitume e aggregato viene meno a causa dell'intrusione dell'acqua nella loro interfaccia); possono essere innescati 2 tipi di meccanismi di danneggiamento:

- Perdita di coesione a causa del rammollimento del legante;
- Perdita di coesione a causa della presenza di umidità nell'interfaccia

Queste tecniche hanno innumerevoli vantaggi ambientali, ma l'utilizzo di additivi chimici potrebbe portare anche a degli svantaggi.

3. MATERIALI E MACCHINARI

3.1 AGGREGATI

Gli aggregati utilizzati per il confezionamento della miscela per lo strato di binder in esame sono:

- ➤ Pietrisco calcareo 12/20
- ➤ Graniglia calcarea 7/12
- ➤ Graniglia calcarea 4/7
- ➤ Sabbia 0/2
- > Filler

Sul materiale è stata effettuata un'operazione di quartatura, su delle assi di legno, al fine di mescolare il materiale e permettere all'acqua in eccesso di evaporare prima di essere messo in dei cassoni per lo stoccaggio. Sono stati prelevati diversi campioni di materiale per effettuare le prove di caratterizzazione. Le prove effettuate sui campioni sono state la granulometria, prove per determinare indice di forma e indice di appiattimento.

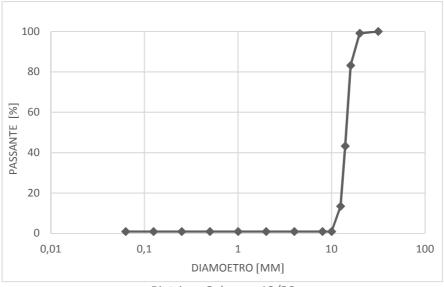
Prima di ogni prova il materiale deve essere lasciato in forno per far evaporare l'acqua all'interno, il campione può definirsi asciutto quando il suo peso non varia dopo due pesate successive a distanza di 5 minuti l'una dall'altra.

La granulometria è una prova che ha lo scopo di determinare la curva granulometrica di un tipo di aggregato. Consiste nell'inserire il campione all'interno di setacci impilati uno sull'altro con aperture decrescenti: 31.5 mm, 20 mm, 16 mm, 14 mm, 12.5 mm, 10 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm, 0.063 mm.

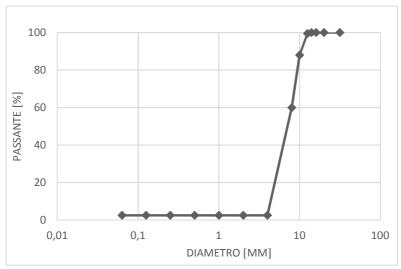
La pila di setacci viene coperta da un coperchio nella parte superiore e da un fondino nella parte inferiore, poi viene inserita in una macchina vibrante per alcuni minuti (*Figura 3.2*). Al termine della prova si pesa il trattenuto ad ogni setaccio, per poi ricavare il passante percentuale per determinare la curva granulometrica.



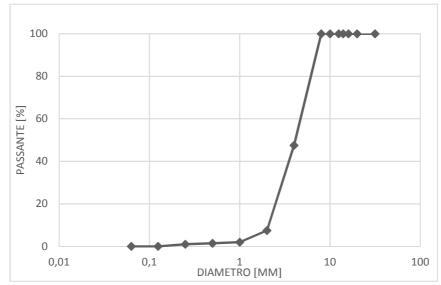
Figura 3.2: Setacci impilati nella macchina vibrante



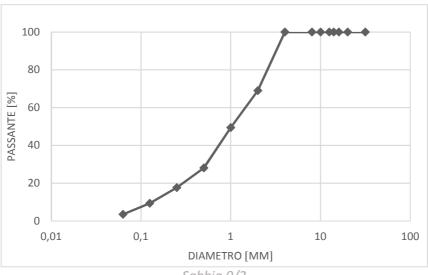
Pietrisco Calcareo 12/20



Graniglia Calcarea 7/12



Graniglia Calcarea 4/7



Sabbia 0/2

La procedura di prova per determinare l'indice di forma, dei soli aggregati grossi, consiste nel misurare con un apposito calibro (*Figura 3.3*) la lunghezza massima di ogni aggregato che fa parte del campione di prova, per poi inserire il granulo all'interno di una apertura secondaria, controllando se il granulo passa attraverso. In seguito viene pesato l'intero campione M1 e il solo passante M2. Così da determinare infine l'indice di forma con la formula:

$$I.F = \left(\frac{M2}{M1}\right) * 100$$

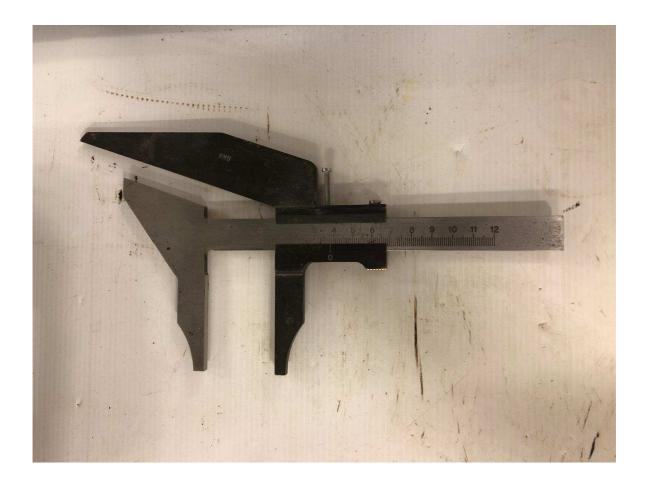


Figura 3.3: Calibro per indice di forma

La procedura di prova per determinare l'indice di appiattimento, dei soli aggregati grossi, consiste nel far passare il campione di materiale all'interno di setacci a barre longitudinali (Figura 3.4), pesando il trattenuto così da ottenere un passante e un trattenuto percentuale.

Questi setacci non vengono inseriti in una macchina vibrante ma il processo di vagliatura viene effettuato manualmente dall'operatore.



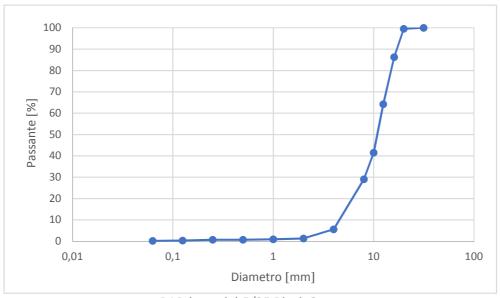
Figura 3.4: Setacci a barre longitudinali

3.2 FRESATO STRADALE

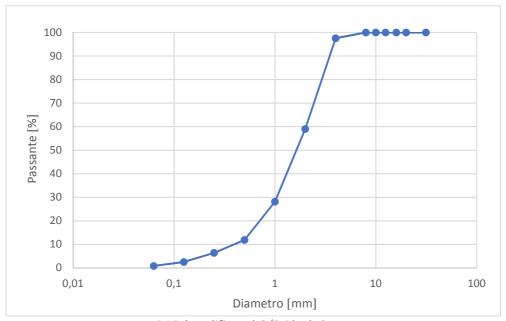
Il fresato stradale o RAP (Reclaimed asphalt pavement) è un materiale che deriva dal processo di fresatura degli strati legati delle pavimentazioni stradali, è composto da bitume e aggregato, si presenta come semplice aggregato e viene caratterizzato proprio come quest'ultimo. Le prove che si effettuano sul fresato stradale sono la granulometria, prove per determinare indice di forma e di appiattimento. È stata effettuata un'ulteriore prova per determinare il contenuto di bitume all'interno del fresato, questo processo viene chiamato estrazione. Le tipologie di fresato utilizzato per il confezionamento delle miscele sono:

- ➤ RAP attuale 5/25
- > RAP modificato 0/5
- ➤ RAP modificato 5/25

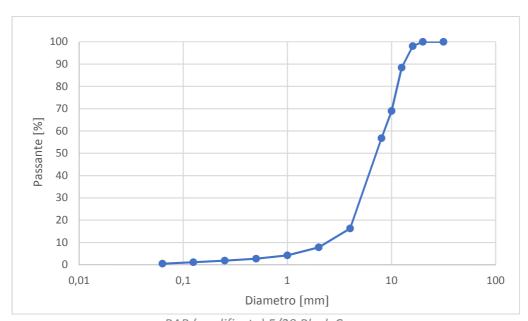
Le curve granulometriche che caratterizzano il fresato stradale sono due: la Black curve e la White curve dove la Black curve è la curva granulometrica dell'aggregato ricoperto da bitume, la White curve è la curva granulometrica dell'aggregato pulito, dopo aver effettuato l'estrazione.



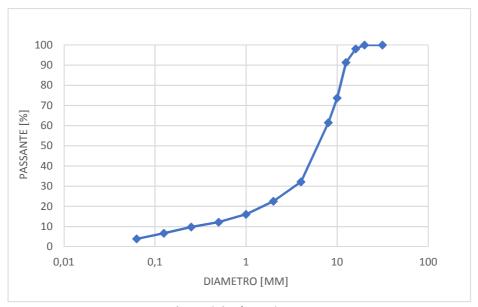
RAP (attuale) 5/25 Black Curve



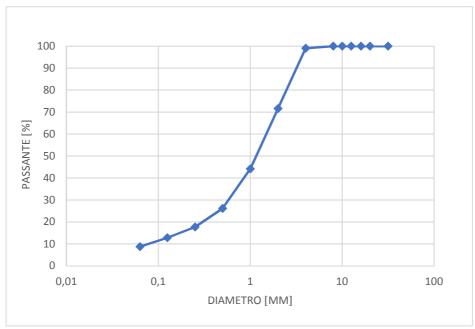
RAP (modificato) 0/5 Black Curve



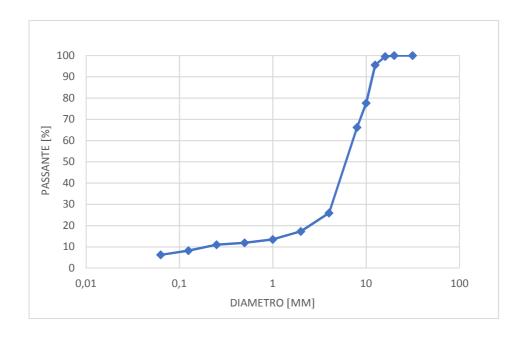
RAP (modificato) 5/20 Black Curve



RAP (attuale) 5/20 White Curve



RAP (modificato) 0/5 White Curve



RAP (modificato) 5/20 White Curve

3.3 BITUME

Il bitume è un derivato di scarto della lavorazione del petrolio, un materiale che si presenta di un colore scuro, rigido e fragile a bassa temperatura, ma all'aumentare di quest'ultima si scioglie diventando viscoso. Il bitume utilizzato per confezionare le miscele è un bitume modificato Hard M (*Figura 3.5*), la sua nomenclatura tecnica è indicata come "PMB 45/80-70", dove la sigla PMB sta per "Polymer Modified Bitumes". La scheda tecnica del bitume viene fornita direttamente dal produttore con tutte le caratteristiche (*Figura 3.6*).

Demolald accomplet	O			Prestazione		
Requisiti essenziali	Caratteristiche	Metodo	U.d.M.	min	max	Classe
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	45	80	4
Consistenza alle temperature elevate di servizio	Punto di Rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	70		4
Coesione	Force Ductility Test a 10°C Trazione a lenta velocità	UNI EN 13589 UNI EN 13703	J/cm ²	3,0		7
Durabilità Resistenza	Variazione di massa		%		0,5	3
all'invecchiamento RTFOT	Penetrazione a 25°C residua	UNI EN 1426	%	60		7
EN12607-1	Incremento del punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C		8	2
Infiammabiltà	Flash point	EN ISO 2592	°C	250		2
Altre proprietà						
Viscosità dinamica	Viscosità a 160°C	UNI EN 13702/2	Pa.s	0,40		
Recupero di deformazione	Ritorno Elastico a 25°C.	UNI EN 13398	%	80		3
Ulteriori richieste tecniche	·					
Stabilità allo stoccaggio	Δ Punto di rammollimento.	UNI EN 1427	°C		5	2
EN13399	Δ Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		9	2

Figura 3.6: Scheda tecnica



Figura 3.5: Bitume Hard M

3.4 ADDITIVI

In presenza di elevate concentrazioni di fresato, l'utilizzo di un additivo per la gestione delle temperature di produzione dei conglomerati bituminosi e per le produzioni a tiepido (WMA).

L'additivo aggiunto nel bitume consente 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.

In conglomerati confezionati con questo tipo di additivo riducono drasticamente fumi ed emissioni in atmosfera di CO2.

Nel caso studio in esame sono stati utilizzati 2 differenti tipi di additivo (Additivo 1-2), cosi da osservare le prestazioni di un additivo rispetto ad un altro, sono stati utilizzati singolarmente con lo stesso dosaggio su ogni miscela.

L'additivo 1 (*Figura 3.6*) è composto da una miscela complessa di origine vegetale additivata con sostanze attivanti.

PROPRIETA' FISICHE	
Aspetto a 25°C	LIQUIDO
Pour Point (temperatura operativa minima)	≥-5°C
Densità a 25°C	0.77 ÷ 0.79 g/cm3
Flash Point	> 90°C
Colore	CHIARO
Viscosità a 25°C	30 ÷ 40 cP

L'additivo 2 (*Figura 3.7*) è un additivo polifunzionale a formulazione complessa per il riutilizzo di percentuali variabili di fresato a base di achil-ammido poliammine.

PROPRIETA' FISICHE	
Aspetto a 25°C	LIQUIDO
Densità a 25°C	0.94 g/cm3
Flash Point	> 90°C
Colore	SCURO
Viscosità a 25°C	150 cP
PH	N.A.

Entrambi gli additivi possono essere stoccati contenuti all'interno di contenitori chiusi.



Figura 3.6: Additivo 1



Figura 3.7: Additivo 2

3.5 MISCELATRICE

La miscela per lo strato di base è stata confezionata con un miscelatore industriale, ad una temperatura di 130°C. La macchina si presenta divisa in due parti la parte superiore dove è posizionata la pala miscelatrice e una parte inferiore dove è alloggiato il cassone per il deposito dei materiali, le due parti possono essere comandate con dei tasti posizionati al lato della macchina che permettono il sollevamento della parte superiore o il ribaltamento del cassone. La miscelatrice ha un display dove è possibile regolare i dettagli di miscelazione e i programmi da utilizzare. La miscela in esame è stata prodotta impostando tre diverse fasi di miscelazione, una prima fase (*Figura 3.13*) con soli aggregati, una seconda fase (*Figura 3.14*) con il bitume e una terza fase (*Figura 3.15*) in cui viene aggiunto anche il filler. La macchina prima di essere programmata va aperta completamente premendo contemporaneamente il pulsante di sicurezza e il pulsante di apertura (*Figura 3.8*), poi richiusa premendo contemporaneamente il pulsante di sicurezza e il pulsante di chiusura (*Figura 3.9*).



Figura 3.8: Pulsante apertura



Figura 3.9: Pulsante chiusura

Dal menu principale del display possono essere cambiati i parametri di prova premendo il tasto "+" (*Figura 3.10*), così da far aprire un nuovo menu (*Figura 3.11*) dove sono possibili fare delle operazioni:

- Se si preme il pulsante → si può accedere al menu di modifica del secondo programma
- Se si preme per una seconda volta il tasto → si può tornare al menu precedente (*Figura 3.10*)
- Scelto il programma da modificare premendo il pulsante I viene aperto il menu dove è possibile modificare i parametri del programma 1; è possibile modificare il tempo in cui il miscelatore mantiene la temperatura prima di iniziare la miscelazione vera e propria (Hold time), è possibile modificare quest'ultima premendo il tasto I, il tempo inizierà a lampeggiare, premendo "+" o "-"è possibile aumentare o diminuire il tempo; per confermare premere il tasto I.
- Premendo il tasto → è possibile accedere al menu per la modifica della temperatura il secondo parametro. Il procedimento è il medesimo.
- Premendo il tasto → è possibile accedere al menu per la modifica dei giri al minuto. Il procedimento è il medesimo.
- Premere il tasto → per tornare al menu iniziale.

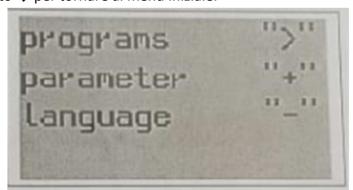


Figura 3.10

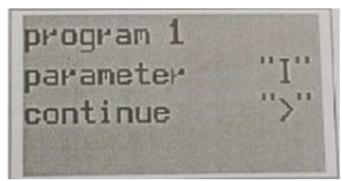


Figura 3.11

Dal menu principale è possibile accedere al menu per la scelta del programma, premendo il tasto > così da far aprire un nuovo menu (*Figura 3.12*), qui le operazioni possibili sono:

- Premendo il tasto → è possibile passare al Programma 2
- Premendo una seconda volta il tasto → si può tornare al menu principale
- Scelto il programma da avviare premere il pulsante I per farlo partire.

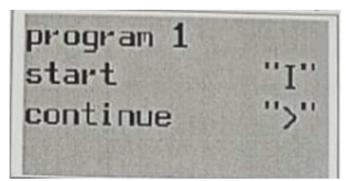


Figura 3.12

Finito il programma 1 è possibile passare al programma 2, per eseguire correttamente le operazioni è necessario seguire le seguenti indicazioni per il passaggio dal primo al secondo programma:

- Aprire il coperchio premendo contemporaneamente il pulsante di sicurezza e il pulsante di apertura fino a metà
- Inserire il materiale, richiudere il coperchio premendo contemporaneamente i pulsanti di sicurezza e quello di chiusura
- Premere il pulsante I per proseguire con il secondo programma.

Terminato il programma aprire la macchina e rovesciare il contenuto all'interno di una teglia (*Figura 3.16*), per poi essere messa in forno.



Figura 3.13: Fase 1



Figura 3.14: Fase 2



Figura 3.15: Fase 3



Figura 3.16: Conglomerato bituminoso nella teglia

3.6 PRESSA GIRATORIA

Dopo aver fatto riscaldare il materiale alla temperatura di compattazione, si procede inserendo una determinata quantità di conglomerato bituminoso all'interno della fustella (contenitore in acciaio) con l'ausilio di un imbuto, per poi essere inserito nella pressa giratoria. La Pressa giratoria è una macchina che ci permette di addensare il provino e ricavare la curva di compattazione. Può funzionare impostando l'altezza finale del provino o impostando il numero di giri. La macchina è dotata di un display dove è possibile impostare i parametri generali della prova. I provini della miscela di binder sono stati addensati fissando il numero di giri totali. La fustella di diametro noto da 100 mm (*Figura 3.17*) viene inserita all'interno della macchina (*Figura 3.18*) e fatta rotare fino ad incastrarsi con un perno. Al termine della prova la fustella viene estratta e con l'aiuto di un sollevatore idraulico si estrae il provino addensato (*Figura 3.19*).



Figura 3.17: Fustella in Acciaio 100mm



Figura 3.18: Pressa giratoria



Figura 3.19: Provino addensato

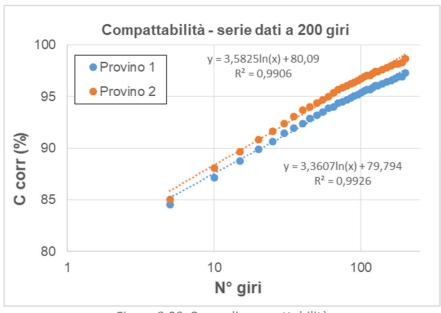


Figura 3.20: Curva di compattabilità

3.7 TRAZIONE INDIRETTA

I provini dopo 3 giorni di stagionatura in aria a temperatura ambiente e in acqua a 40°C, vengono messi a condizionare in una camera climatica a 25°C per 4 ore. Raggiunta la temperatura di prova (25°C) in camera climatica (*Figura 3.24*) è possibile procedere con la rottura a trazione indiretta. La macchina (*Figura 3.21*) può essere utilizzata per diverse tipologie di prove, modificando le impostazioni del software (*Figura 3.22*) e il piattello di alloggio del provino. La prova di rottura a trazione indiretta è descritta da 4 fasi:

- Inserire dati del provino all'interno del software
- Alloggiare il provino sulle basette delle piastre e allinearlo correttamente
- Procedere con la prova
- Procedere al calcolo dei risultati e all'archiviazione

I dati richiesti da inserire sono l'altezza del provino, il diametro e il peso. Un provino alla volta viene prelevato dalla camera climatica ed inserito al centro delle basette allineando gli assi con la verticale, inserito correttamente il provino si può procedere con la prova cliccando il tasto di avvio. La prova è terminata quando il provino si rompe e la macchina si arresta automaticamente. Si calcolano i risultati (*Figura 3.23*) e poi con un tasto di archiviazione vengono salvati i dati di quella prova.

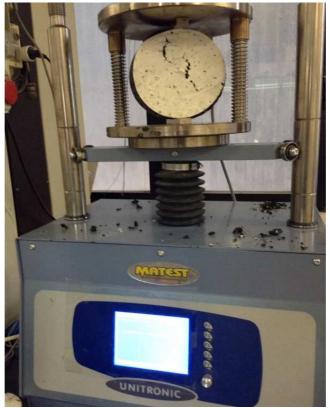


Figura 3.21: Prova a trazione indiretta

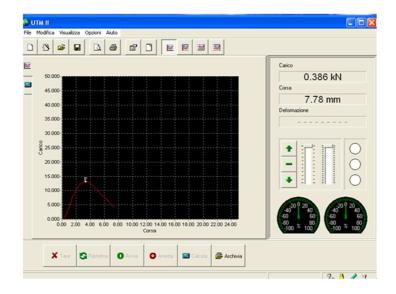


Figura 3.22: Software per la trazione indiretta

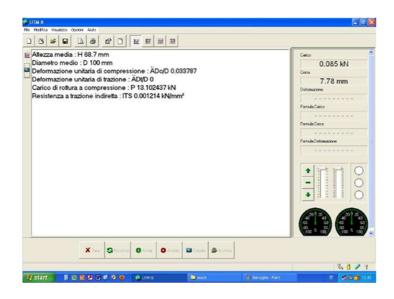


Figura 3.23: Risultati della prova



Figura 4.24: Camera climatica



Miscela di Binder



Provino portato a rottura

4.PROGRAMMA SPERIMENTALE

4.1 PREPARAZIONE MISCELE

L'obbiettivo di questa analisi sperimentale è quello di valutare le prestazioni meccaniche e volumetriche delle miscele di conglomerato bituminoso per uno strato di binder al variare di alcune componenti principali rispetto ad una miscela tradizionale quali:

- Quantità bitume aggiunto
- Tipologie di additivo utilizzato
- Quantità di fresato aggiunto

Per suddividere le diverse tipologie di miscele si è utilizzata una nomenclatura alfanumerica in cui la lettera iniziale sta ad indicare lo strato di pavimentazione analizzato (B), la prima cifra rappresenta la tipologia di additivo, i due numeri successivi fanno riferimento alla percentuale di fresato stradale rispetto al totale degli aggregati, le ultime due cifre indicano la percentuale di bitume aggiunto rispetto agli aggregati.

Esempio: B1-35-2.7 (Figura 4.1)

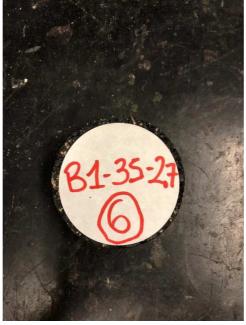


Figura 4.1: nomenclatura

Il confezionamento delle miscele è stato eseguito con un procedimento standard;

Inizialmente gli aggregati sono stati prelevati dai rispettivi cassoni e riscaldati in un forno industriale (*Figura 4.2*) alla temperatura di 130°C per 3 ore all'interno di specifiche teglie di alluminio. Mentre il bitume modificato è stato riscaldato per 2 ore alla temperatura di 170°C in un altro forno.



Figura 4.2: forno industriale

Raggiunto un discreto stato di fluidità, al suo interno è stato mescolato uno dei due additivi (*Figura 4.4*) precedentemente pesato mediante una bilancia millesimale (*Figura 4.5*).



Figura 4.4: additivo 1-2

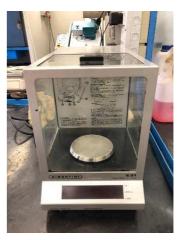


Figura 4.5: Bilancia millesimale

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 omogenea. Terminata questa breve fase è stato versato il quantitativo corretto di bitume additivato avvalendosi di una bilancia elettronica per poi avviare la seconda fase di miscelazione. Conclusasi quest'ultima è stato infine aggiunto il filler e stata avviata la fase finale di mescolazione, al termine di essa è stato ribaltato il cestello cosi da depositare il conglomerato all'interno di una teglia (*Figura 4.6*) per poi essere trasferita rapidamente all'interno di un forno preriscaldato alla temperatura di compattazione di 120°C e prontamente suddiviso in nove teglie da 1000 grammi;

La miscela tradizionale è stata confezionata nella stessa modalità ma con temperature più elevate.



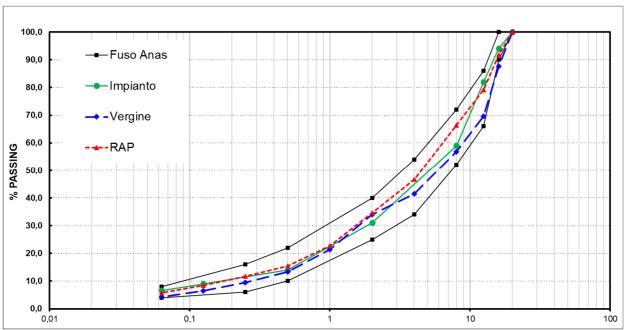
Figura 4.6: teglia conglomerato

4.2 RICETTE E FUSI PER IL CONFEZZIONAMENTO DELLE MISCELE

Sono state realizzate 9 miscele totali:

- 1 miscela Tradizionale con tecnica di riciclaggio a caldo;
- 8 miscele con tecniche a tiepido WMA;

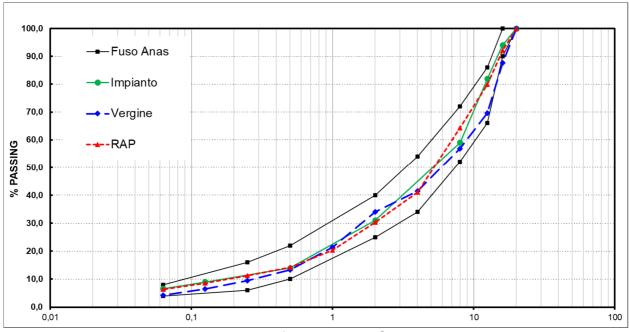
B TRADIZIONALE							
Pezzatura	%						
PIETRISCO 12/20	2920	21,9					
GRANIGLIA 7/12	1520	11,4					
GRANIGLIA 4/7	1900	14,3					
SABBIA 0/2	3810	28,6					
FILLER	630	4,7					
RAP attuale 5/25	2540	19,1					



Fuso granulometrico attuale

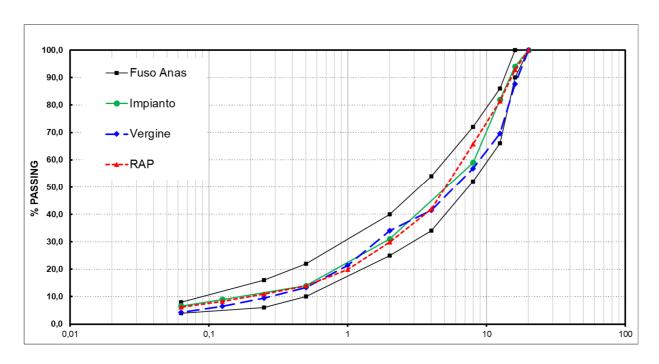
B1-30-3.0/B2-30-3.0							
Pezzatura	%						
PIETRISCO 12/20	2420	22,0					
GRANIGLIA 7/12	1980	18,0					
GRANIGLIA 4/7	990	9,0					
SABBIA 0/2	1870	17,0					
FILLER	440	4,0					
RAP 0/5 modificato	1100	10,0					
RAP 5/20 modificato	2200	20,0					

B1-30-3.2/B2-30-3.2						
Pezzatura	g	%				
PIETRISCO 12/20	2420	22,0				
GRANIGLIA 7/12	1980	18,0				
GRANIGLIA 4/7	990	9,0				
SABBIA 0/2	1870	17,0				
FILLER	440	4,0				
RAP 0/5 modificato	1100	10,0				
RAP 5/20 modificato	2200	20,0				



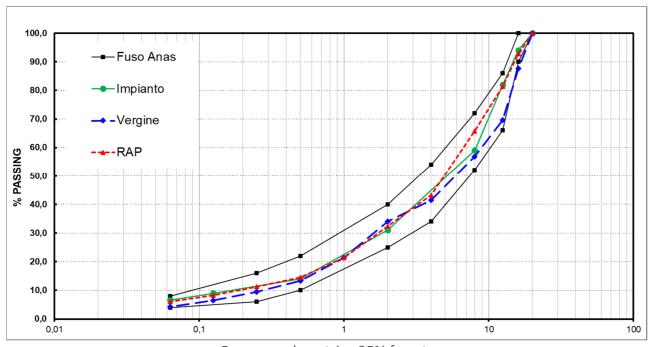
Fuso granulometrico 30% fresato

B1-40-2.5/B2-40-2.5						
Pezzatura	gg	%				
PIETRISCO 12/20	2200	20,0				
GRANIGLIA 7/12	1650	15,0				
GRANIGLIA 4/7	1045	9,5				
SABBIA 0/2	1375	12,5				
FILLER	330	3,0				
RAP 0/5 modificato	1650	15,0				
RAP 5/20 modificato	2750	25,0				



Fuso granulometrico 40% fresato

B1-35-2.7/B2-35-2.7						
Pezzatura	g	%				
PIETRISCO 12/20	2200	20,0				
GRANIGLIA 7/12	1650	15,0				
GRANIGLIA 4/7	770	7,0				
SABBIA 0/2	2200	20,0				
FILLER	330	3,0				
RAP 0/5 modificato	1100	10,0				
RAP 5/20 modificato	2750	25,0				



Fuso granulometrico 35% fresato

L'indagine in esame ha lo scopo di ottimizzare la compattabilità e ridurre al minimo di materiale costoso, cioè massimizzare il quantitativo di fresato stradale (RAP) e minimizzare il bitume aggiunto. Si sono pertanto costruite tre curve di progetto differenziate dalla percentuale di fresato, rispettivamente di 30% e 40% e 45%. Queste percentuali, oltre a dover ricadere all'interno del fuso, devono garantire un adeguato quantitativo di bitume totale; il bitume totale è dato dalla somma del bitume aggiunto e dal bitume riattivato dal fresato. Dal punto di vista teorico si considera per le miscele di conglomerato bituminoso tradizionali che il 30% del bitume derivante dal fresato non si riattivi mentre per le miscele tiepide questa percentuale sale al 40% dovuta al fatto che le temperature in gioco sono inferiori. Con queste osservazioni, in fase di mix design, si sono confrontate di pari passo sia la predisposizione delle miscele alla compattabilità rispettando il fuso granulometrico Anas, sia il bitume totale riferito alla miscela.

4.2 MASSA VOLUMICA DEL PROVINO

Sono stati confezionati nove provini, per l'addensamento e il calcolo delle masse volumiche è stato prodotto un provino a 120 giri, due provini a 200 giri e sei provini per la trazione indiretta a 200 giri.

Prima di essere pesati in aria ed in acqua i provini dovevano raffreddarsi dopo essere stati compattati.

Il calcolo della massa volumica consiste nel fare 4 pesate:

- Pesata in aria
- Pesata idrostatica dopo 5 minuti in acqua (Figura 4.11)
- Pesata idrostatica dopo 30 minuti in acqua
- Pesata in aria dopo 30 minuti in acqua (SSD)

Si è misurata l'altezza media del provino con un calibro, misurando l'altezza su tutte e quattro le diagonali e facendo la media.

La pesata in aria è stata effettuata con una bilancia elettronica (*Figura 4.7*), per la pesata idrostatica (*Figura 4.8*) a 5 minuti e dopo 30 minuti bisogna inserire il provino all'interno di un cestello (*Figura 4.9*) immerso in acqua ed attendere che il provino si assenti (il peso non deve variare). Per effettuare la pesata in aria dopo 30 minuti (SSD) il provino va asciugato superficialmente con un panno e poi pesato. Viene monitorata la temperatura dell'acqua attraverso una sonda (*Figura 4.10*)

Massa volumica DRY:
$$\rho_{dry} = \rho w \frac{M1}{M1-M2}$$
 Massa volumica SSD:
$$\rho_{SSD} = \rho w \frac{M1}{M4-M3}$$
 Massa volumica geometrica :
$$\rho_{geom} = \frac{M1}{\frac{\pi}{2} \times h \times d^2}$$

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)

d = diametro medio del provino (mm)



Figura 4.7: Bilancia Elettronica



Figura 4.8: Pesata idrostatica



Figura 4.9: Cestello



Figura 4.10: Sonda



Figura 4.11: Provini in acqua

5. RISULTATI PROVE

Il confezionamento dei nove provini per ogni miscela di conglomerato tiepido è stato attuato al fine di valutare le prestazioni volumetriche, in termini di vuoti residui, e meccaniche riferite 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 realizzato con un numero di giri pari a 120 (indicato con N2 come da capitolato Anas S.p.A.), e due con un numero di giri pari a 200 (N3) mentre i restanti sei sono stati esaminati, tre in condizioni asciutte e tre in condizioni umide.

I risultati delle prove che verranno esposti di seguito, hanno come limitazioni i valori di capitolato Anas riportati in tabella (*Figura 5.1*).

Binder 0-20 Hard-RAP							
% bitume rispetto miscela (con fresato)	4.3-5.5						
Diam.provino [mm]	100						
N1	10						
N2	120						
N3	200						
Vuoti a N1 rotazioni [%]	11-15						
Vuoti a N2 rotazioni [%]	3-6						
Vuoti a N3 rotazioni [%]	≥2						
Resist.traz indir. a 25 °C [N/mm²]	0.95-1.70 (a N3 rotazioni)						
Coeff.traz.indir. a 25 °C [N/mm²]	≥75 (a N3 rotazioni)						

Figura 5.1: Requisiti di Capitolato Anas S.p.A.

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 : $\rho_{dry} = \rho w \frac{M1}{M1 - M2}$

Massa volumica SSD : $\rho_{SSD} = \rho w \frac{M1}{M4-M3}$

Massa volumica geometrica : $\rho_{geom} = \frac{M1}{\frac{\pi}{2} \times h \times d^2}$

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)

d = diametro medio del provino (mm)

Massa volumica massima: $\rho_{MAX} = \frac{100}{(\frac{B}{\rho_{bit}} + \frac{Agg}{\rho_{agg}})}$

B = contenuto di bitume rispetto miscela (%)

 ρ_{bit} = massa volumica bitume (g/cm³)

Agg = contenuto di aggregato rispetto miscela (%)

ρ_{agg}= massa volumica aggregati (g/cm³)

Vuoti residui (%): $V_i = \frac{\rho_{max} - \rho_i}{\rho_{max}} \times 100$

 ρ_i = Massa volumica i-esima relativa alla tipologia di vuoti residui (Dry/SSD/Geom)

Di seguito verranno riportate le tabelle contenenti le masse volumiche e i vuoti calcolati seguendo le direttive della normativa. Inoltre, per ogni miscela, verranno inseriti i grafici relativi alla compattabilità e ai vuoti residui rielaborati dai dati restituiti dalla pressa giratoria.

I grafici riferiti a provini addensati a 200 giri (N3) presentano sull'asse delle ascisse il numero di giri e sulle ordinate la compattabilità o i vuoti residui definiti come il complementare a cento della compattabilità ossia:

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

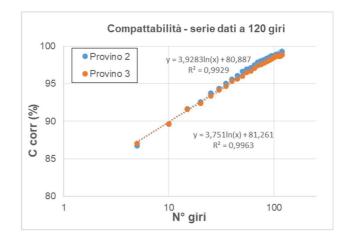
$$V_{corr} = 100 - C_{corr}$$

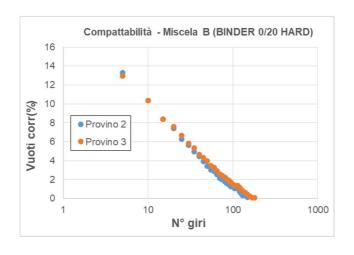
BINDER 0-20 HARD (ρmax= 2,417)										
Provino 1 (a 120 giri)				Provino 2 (a 200 giri)				Provino 3 (a 200 giri)		
M1=	1000	g		M1=	997,5	g		M1=	999,9	g
M2=	584,1	g		M2=	588,6	g		M2=	588,8	g
M3=	584,2	g		M3=	589,6	g		M3=	589,7	g
M4=	1001,1	g		M4=	999,2	g		M4=	1001,5	g
h =	54,8	mm		h =	54,0	mm		h =	53,9	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	mm
T _w	17,8	°C		T _w	17,8	°C		T_w	17,8	°C
ρ w=	0,99870	g/cm ³		ρ w=	0,99870	g/cm³		ρ w=	0,99870	g/cm³
ρ_{dry} =	2,401	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,436	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,429	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,396	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,432	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,425	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,323	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,352	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,362	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	0,67	%
Vuoti _{SSD} =	0,90	%
Vuoti _{geom} =	3,89	%

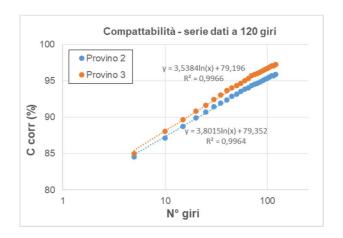
Vuoti _{dry} =	-0,78	%
Vuoti _{SSD} =	-0,61	%
Vuoti _{geom} =	2,71	%

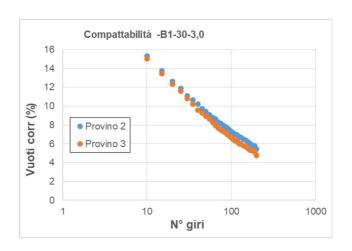
Vuoti _{dry} =	-0,48	%
Vuoti _{SSD} =	-0,31	%
Vuoti _{geom} =	2,29	%



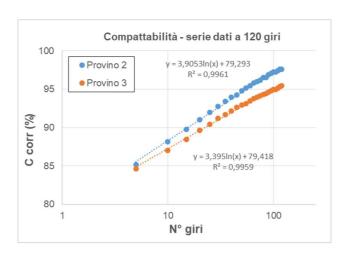


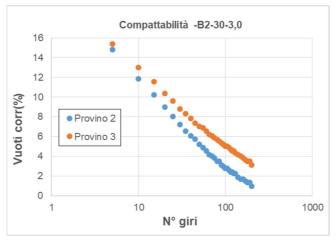
Miscela B1-30-3,0 (ρmax= 2,444)										
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	giri)		Provinc	o 3 (a 200 g	iri)
M1=	998,1	g		M1=	999,7	g		M1=	999,1	g
M2=	584,2	g		M2=	583,7	g		M2=	586,7	g
M3=	584,7	g		M3=	583,9	g		M3=	587,4	g
M4=	1001,4	g		M4=	1003,9	g		M4=	1001,2	g
h =	55,3	mm		h =	55,6	mm		h =	54,7	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	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} =	2,408	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,400	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,419	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,392	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,377	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,411	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,298	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,289	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,326	g/cm ³
Vuoti _{dry} =	1,45	%		Vuoti _{dry} =	1,79	%		Vuoti _{dry} =	1,00	%
Vuoti _{SSD} =	2,12	%		Vuoti _{SSD} =	2,73	%		Vuoti _{SSD} =	1,33	%
Vuoti geom =	5.96	%		Vuoti geom =	6.32	%		Vuoti geom =	4.84	%



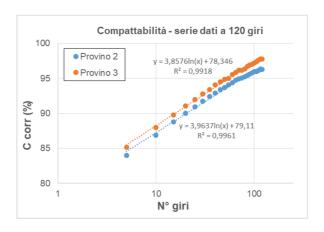


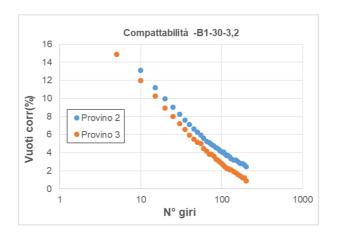
Miscela B2-30-3,0 (ρmax= 2,444)										
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	giri)		Provinc	o 3 (a 200 g	iri)
M1=	997,6	g		M1=	1000,7	g		M1=	999,9	g
M2=	583,9	g		M2=	589,0	g		M2=	582,8	g
M3=	584,9	g		M3=	589,6	g		M3=	584	g
M4=	1001,5	g		M4=	1002,5	g		M4=	1005,8	g
h =	55,4	mm		h =	53,7	mm		h =	55,2	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	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} =	2,408	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,427	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,394	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,391	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,420	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,367	g/cm ³
$ ho_{\text{geom}}$ =	2,293	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,373	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,306	g/cm ³
Vuoti _{dry} =	1,47	%		Vuoti _{dry} =	0,67	%		Vuoti _{dry} =	2,03	%
Vuoti _{SSD} =	2,16	%		Vuoti _{SSD} =	0,96	%		Vuoti _{SSD} =	3,12	%
Vuoti geom =	6,25	%		Vuoti geom =	2,91	%		Vuoti _{geom} =	5,62	%



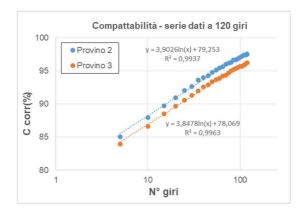


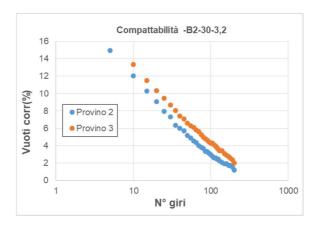
			Mis	cela B1-30	-3,2 (ρn	nax= 2,4	37)			
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	giri)		Provinc	3 (a 200 g	;iri)
M1=	999,8	g		M1=	999,6	g		M1=	997,2	g
M2=	585,6	g		M2=	584,2	g		M2=	586,1	g
M3=	586,7	g		M3=	585,1	g		M3=	587	g
M4=	1001,8	g		M4=	1004,9	g		M4=	999,1	g
h =	55,1	mm		h =	56,1	mm		h =	55	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	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} =	2,411	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,403	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,422	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,405	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,378	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,417	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,310	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,269	g/cm³		ρ_{geom} =	2,308	g/cm ³
Vuoti _{dry} =	0,28	%		Vuoti _{dry} =	0,59	%		Vuoti _{dry} =	-0,21	%
Vuoti _{SSD} =	0,50	%		Vuoti _{SSD} =	1,63	%		Vuoti _{SSD} =	0,04	%
Vuoti geom =	4,43	%		Vuoti _{geom} =	6,15	%		Vuoti _{geom} =	4,50	%



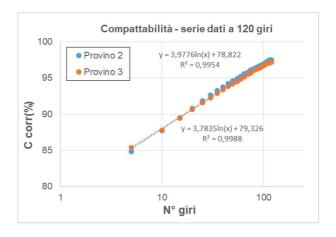


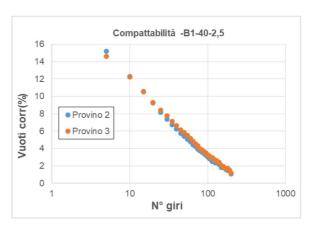
			Mis	scela B2-30)-3,2 (pm	nax= 2,4	37)			
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	giri)		Provinc	o 3 (a 200 g	giri)
M1=	1000,1	g		M1=	1001,3	g		M1=	999,3	g
M2=	582,3	g		M2=	588,1	g	ļ	M2=	586	g
M3=	583,3	g		M3=	588,6	g		M3=	586,9	g
M4=	1005,7	g		M4=	1003,8	g		M4=	1004,8	g
h =	55,4	mm		h =	54,6	mm		h =	55,6	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	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} =	2,390	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,420	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,415	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,364	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,408	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,388	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,298	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,335	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,288	g/cm ³
Vuoti _{dry} =	1,11	%		Vuoti _{dry} =	-0,11	%		Vuoti _{dry} =	0,12	%
Vuoti _{SSD} =	2,19	%		Vuoti _{SSD} =	0,37	%		Vuoti _{SSD} =	1,22	%
Vuoti _{geom} =	4,92	%		Vuoti _{geom} =	3,41	%		Vuoti _{geom} =	5,34	%



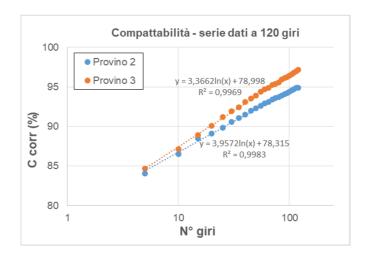


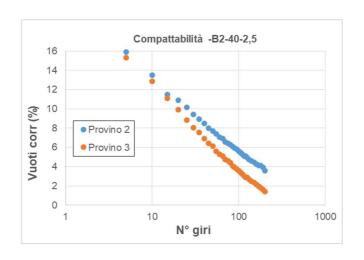
			Mis	scela B1-40)-2,5 (ρn	nax= 2,4	38)			
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	giri)		Provinc	o 3 (a 200 g	giri)
M1=	996,4	g		M1=	1000,3	g		M1=	998,3	g
M2=	576,2	g		M2=	589,2	g	ļ	M2=	587	g
M3=	578,6	g		M3=	589,7	g		M3=	588,3	g
M4=	1002,8	g		M4=	1003,9	g		M4=	1002,0	g
h =	56,5	mm		h =	55,1	mm	ļ	h =	55,7	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	mm
T _w	19,7	°C		T _w	19,7	°C		T_w	19,7	°C
ρ w=	0,99834	g/cm ³		ρ w=	0,99834	g/cm ³		ρ w=	0,99834	g/cm ³
ρ_{dry} =	2,367	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,429	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,423	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,345	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,411	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,409	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,245	g/cm ³		$ ho_{\text{geom}}=$	2,311	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,282	g/cm ³
Vuoti _{dry} =	2,07	%		Vuoti _{dry} =	-0,49	%		Vuoti _{dry} =	-0,24	%
Vuoti _{SSD} =	3,00	%		Vuoti _{SSD} =	0,26	%		Vuoti _{SSD} =	0,34	%
Vuoti _{geom} =	7,11	%		Vuoti _{geom} =	4,38	%		Vuoti _{geom} =	5,60	%





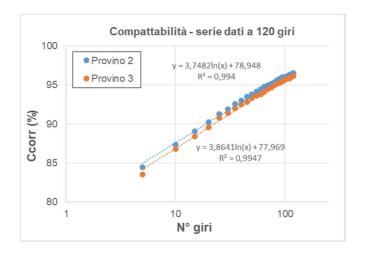
			Mis	scela B2-40)-2,5 (ρn	nax= 2,4	38)			
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	iri)		Provinc	o 3 (a 200 g	iri)
M1=	994,4	g		M1=	1000,1	g		M1=	1000	g
M2=	582	g		M2=	580,1	g		M2=	587,6	g
M3=	582,8	g		M3=	580,7	g		M3=	587,8	g
M4=	999,1	g		M4=	1005,5	g		M4=	1003,3	g
h =	55,7	mm		h =	56,6	mm		h =	54,6	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	mm
T _w	19,7	°C		T_w	19,7	°C		T_w	19,7	°C
ρ w=	0,99834	g/cm ³		ρ w=	0,99834	g/cm ³		ρ w=	0,99834	g/cm ³
ρ_{dry} =	2,407	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,377	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,421	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,385	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,350	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,403	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,273	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,250	g/cm ³		$ ho_{\text{geom}}=$	2,332	g/cm ³
Vuoti _{dry} =	0,42	%		Vuoti _{dry} =	1,66	%		Vuoti _{dry} =	-0,14	%
Vuoti _{SSD} =	1,35	%		Vuoti _{SSD} =	2,77	%		Vuoti _{SSD} =	0,61	%
Vuoti _{geom} =	5,97	%		Vuoti _{geom} =	6,93	%		Vuoti _{geom} =	3,54	%

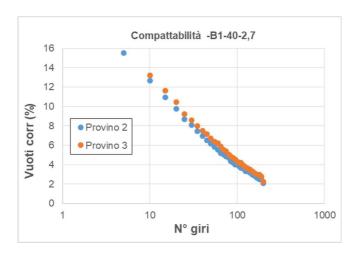




			Mis	scela B1-35	5-2,7 (ρn	nax= 2,4	45)			
Provin	o 1 (a 120 g	iri)		Provin	o 2 (a 200 g	giri)		Provinc	o 3 (a 200 g	giri)
M1=	993,9	g		M1=	998,5	g		M1=	1005,8	g
M2=	579,4	g		M2=	585,3	g		M2=	590,3	g
M3=	582,4	g		M3=	586,3	g		M3=	592,5	g
M4=	1000,3	g		M4=	1002,9	g		M4=	1012,8	g
h =	55,2	mm		h =	55,3	mm		h =	55,5	mm
d =	100	mm		d =	100	mm		d =	100	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} =	2,395	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,413	g/cm ³		ρ_{dry} =	2,417	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,375	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,394	g/cm ³		ρ_{SSD} =	2,390	g/cm ³
$\rho_{\text{geom}} =$	2,293	g/cm ³		ρ_{geom} =	2,299	g/cm ³		$\rho_{\text{geom}} =$	2,307	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	0,94	%	Vuoti _{dry} =	0,17	%	Vuoti _{dry} =	0,00	%
Vuoti _{SSD} =	1,75	%	Vuoti _{SSD} =	0,99	%	Vuoti _{SSD} =	1,14	%
Vuoti _{geom} =	5,17	%	Vuoti _{geom} =	4,90	%	Vuoti _{geom} =	4,55	%





Provir	no 1 (a 120 g	giri)
M1=	1000,2	g
M2=	582,1	g
M3=	583	gg
M4=	1007,1	g
h =	56,6	mm
d =	100	mm
T _w	18,1	°C
ρ w=	0,99865	g/cm ³

Mis	cela	B2-35-	2,7 ((pmax=	2,445	5)

	, (1-	- ,						
Provin	Provino 2 (a 200 giri)							
M1=	1000,4	g						
M2=	586,2	g						
M3=	587,2	g						
M4=	1007,3	g						
h =	55,6	mm						
d =	100	mm						
T_w	18,1	°C						
ρ w=	0,99865	g/cm ³						

Provin	o 3 (a 200 g	giri)
M1=	1003,1	80
M2=	585	g
M3=	586,6	g
M4=	1004,2	80
h =	55,2	mm
d =	100	mm
T _w	18,1	°C
ρ w=	0,99865	g/cm ³

ρ_{dry} =	2,389	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,355	g/cm ³
$ ho_{\text{geom}}=$	2,250	g/cm ³

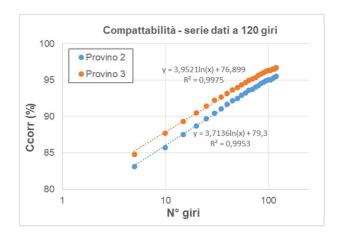
ρ_{dry} =	2,412	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,378	g/cm ³
ρ_{geom} =	2,291	g/cm ³

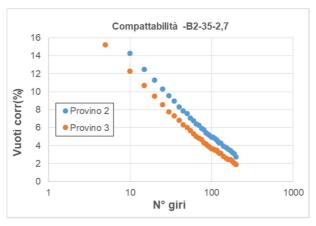
$\rho_{dry} =$	2,396	g/cm ³
ρ_{SSD} =	2,399	g/cm ³
ρ _{geom} =	2,314	g/cm ³

Vuoti _{dry} =	1,17	%
Vuoti _{SSD} =	2,57	%
Vuoti _{geom} =	6,93	%

Vuoti _{dry} =	0,22	%	
Vuoti _{SSD} =	1,63	%	
Vuoti _{geom} =	5,23	%	

Vuo	oti _{dry} =	0,89	%
Vuo	ti _{SSD} =	0,77	%
Vuoti	geom =	4,29	%





5.2 TRAZIONE INDIRETTA

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 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)

 $\delta_{\rm C}$ = 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 seguenti tabelle sono indicate le dimensioni del provino, il tipo di condizionamento (Dry o Wet), i vuoti (metodo geometrico e metodo Dry) ed infine tutti i parametri restituiti dalla prova eseguita.

	Miscela BINDER 0-20 HARD									
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9			
H _{media}	mm	54,1	53,9	54,9	53,9	54,9	53,6			
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100			
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet			
Vuoti _{dry}	%	1,2	0,0	1,9	0,1	1,3	0,0			
Vuoti _{geom}	%	2,9	2,3	4,2	2,2	4,0	1,9			
δ_{C} / D	-	0,02354	0,02552	0,02359	0,02415	0,02576	0,02570			
P	KN	10,7	11,8	10,5	12,3	10,1	11,8			
ITS	Мра	1,255	1,395	1,212	1,450	1,173	1,384			
CTI	Мра	83,8	85,9	80,7	94,3	71,5	84,6			
ITS _{dry}	Мра				1,34					
CTI _{dry} (medio)	Мра				83,9					
ITS _{wet}	Мра		1,28							
ITSR	%				95,8					

	Miscela B1-30-3,0									
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9			
H_{media}	mm	56,6	55,6	55,2	56,7	55,8	55,5			
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100			
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet			
Vuoti _{dry}	%	4,9	3,4	2,8	4,8	2,8	3,6			
Vuoti _{geom}	%	8,8	7,2	6,5	9,1	7,4	7,0			
δ_{c} / D	-	0,02816	0,02559	0,02942	0,02608	0,02614	0,02636			
Р	KN	12,1	14,1	13,6	12,4	14,6	13,2			
ITS	Мра	1,365	1,614	1,572	1,390	1,658	1,510			
СТІ	Мра	76,1	99,1	83,9	83,7	99,6	90,0			
ITS _{dry}	Мра				1,55					
CTI _{dry} (medio)	Мра				94,1					
ITS _{wet}	Мра		1,48							
ITSR	%				95,4					

Miscela B2-30-3,0									
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9		
H _{media}	mm	54,8	54,7	56,1	55,6	54,9	57,1		
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100		
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet		
Vuoti _{dry}	%	3,7	3,4	4,9	3,8	3,4	4,2		
Vuoti _{geom}	%	5,9	5,6	8,0	7,1	6,0	9,7		
δ_{c} / D	-	0,02566	0,03776	0,02353	0,02342	0,02785	0,02612		
Р	KN	15,0	15,9	12,9	13,2	15,4	14,0		
ITS	Мра	1,744	1,854	1,467	1,512	1,790	1,558		
CTI	Мра	106,8	77,1	97,9	101,4	101,0	93,7		
ITS _{dry}	Мра			:	1,72				
CTI _{dry} (medio)	Мра				93,2				
ITS _{wet}	Мра		1,59						
ITSR	%				92,5				

Miscela B1-30-3,2										
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9			
H_{media}	mm	56,1	56,1	55,7	55,4	56,7	56,6			
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100			
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet			
Vuoti _{dry}	%	2,4	2,6	3,7	2,7	3,4	3,1			
Vuoti _{geom}	%	7,8	6,5	7,3	6,8	8,8	8,6			
δ_{c} / D	-	0,03698	0,02831	0,03233	0,02947	0,03018	0,03345			
P	KN	11,7	13,2	14,8	14,1	12,6	13,9			
ITS	Мра	1,322	1,523	1,695	1,617	1,412	1,559			
СТІ	Мра	56,2	84,5	82,4	86,2	73,5	73,2			
ITS _{dry}	Мра			:	1,52					
CTI _{dry} (medio)	Мра		81,4							
ITS _{wet}	Мра		1,53							
ITSR	%			1	00,5					

Miscela B2-30-3,2										
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9			
H_{media}	mm	54,4	55,6	56,3	56,2	56,1	56,0			
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100			
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet			
Vuoti _{dry}	%	2,3	2,8	3,2	3,1	3,2	3,7			
Vuoti _{geom}	%	5,1	7,0	8,1	8,0	7,9	7,5			
δ_{c} / D	-	0,02974	0,02855	0,02946	0,03135	0,03155	0,03432			
Р	KN	15,6	12,9	12,9	14,1	13,7	14,1			
ITS	Мра	1,790	1,481	1,461	1,594	1,557	1,602			
СТІ	Мра	94,5	81,5	77,9	79,9	77,5	73,3			
ITS _{dry}	Мра			:	1,54					
CTI _{dry} (medio)	Мра				79,6					
ITS _{wet}	Мра		1,62							
ITSR	%			1	.04,8					

Miscela B1-40-2,5										
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9			
H _{media}	mm	56,9	54,7	55,6	55,8	56,3	55,1			
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100			
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet			
Vuoti _{dry}	%	1,4	1,4	1,0	3,7	1,4	2,0			
Vuoti _{geom}	%	9,1	5,5	6,6	7,5	8,2	5,8			
δ_{C} / D	-	0,03048	0,02606	0,02586	0,02791	0,02431	0,02603			
P	KN	15,9	17,6	16,5	17,0	13,6	16,6			
ITS	Мра	1,775	2,047	1,889	1,945	1,534	1,920			
СТІ	Мра	91,5	123,4	114,7	109,5	99,1	115,9			
ITS _{dry}	Мра				1,84					
CTI _{dry} (medio)	Мра			1	.10,6					
ITS _{wet}	Мра				1,86					
ITSR	%			1	.01,0					

Miscela B2-40-2,5									
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9		
H _{media}	mm	56,5	56,4	55,5	55,6	55,5	55,6		
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100		
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet		
Vuoti _{dry}	%	3,2	2,7	3,2	3,1	2,8	3,2		
Vuoti _{geom}	%	8,4	8,2	6,8	6,9	7,1	6,9		
δ_{C} / D	-	0,02813	0,02527	0,02682	0,02480	0,03217	0,02651		
P	KN	14,3	14,8	16,9	16,0	14,6	16,6		
ITS	Мра	1,606	1,675	1,943	1,797	1,671	1,896		
CTI	Мра	89,7	104,1	113,8	113,8	81,6	112,3		
ITS _{dry}	Мра			:	1,71				
CTI _{dry} (medio)	Мра				99,8				
ITS _{wet}	Мра		1,82						
ITSR	%			1	.05,9				

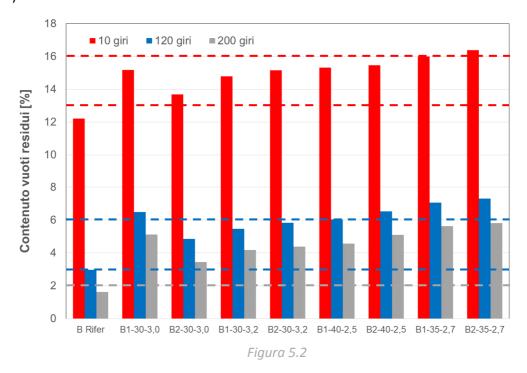
	Miscela B1-35-2,7									
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9			
H _{media}	mm	56,2	56,3	56,3	56	55,7	55,8			
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100			
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet			
Vuoti _{dry}	%	2,0	2,1	3,1	2,5	2,8	2,6			
Vuoti geom	%	7,4	7,3	7,6	6,9	6,7	6,6			
δ_{C} / D	-	0,03348	0,03282	0,02973	0,03182	0,02987	0,02924			
P	KN	14,2	14,3	14,1	14,1	15,0	15,4			
ITS	Мра	1,608	1,616	1,594	1,606	1,682	1,762			
CTI	Мра	75,5	77,3	84,2	79,3	88,5	94,6			
ITS _{dry}	Мра			;	1,63					
CTI _{dry} (medio)	Мра				81,7					
ITS _{wet}	Мра		1,65							
ITSR	%			1	.01,2					

Miscela B2-35-2,7							
	Unità misura	PROVINO 4	PROVINO 5	PROVINO 6	PROVINO 7	PROVINO 8	PROVINO 9
H _{media}	mm	55,3	56	55,4	55,5	55,3	55,9
Diametro	mm	100	100	100	100	100	100
Condizionamento	wet/dry	wet	dry	wet	dry	dry	wet
Vuoti _{dry}	%	2,5	3,3	2,0	3,3	3,3	3,0
Vuoti _{geom}	%	6,0	6,9	6,2	6,0	5,7	6,8
δ_{c} / D	-	0,02810	0,03964	0,03169	0,03431	0,03064	0,03655
Р	KN	14,6	16,7	15,4	15,5	16,4	15,4
ITS	Мра	1,677	1,904	1,764	1,782	1,883	1,764
CTI	Мра	93,8	75,5	87,4	81,6	96,5	75,8
ITS _{dry}	Мра	1,86					
CTI _{dry} (medio)	Мра	84,5					
ITS _{wet}	Мра	1,74					
ITSR	%	93,5					

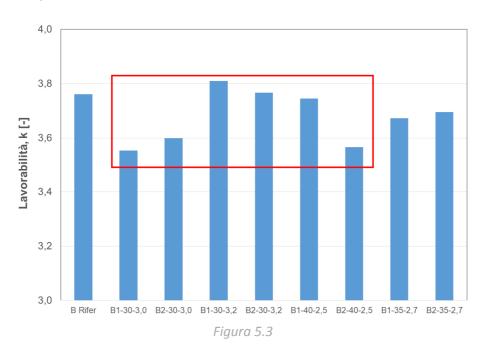
5.3 RIEPILOGO

A partire dai dati ottenuti dalle prove effettuate, si sono costruiti degli istogrammi riepilogativi che permettono un confronto immediato e facilmente leggibile tra le diverse miscele confezionate.

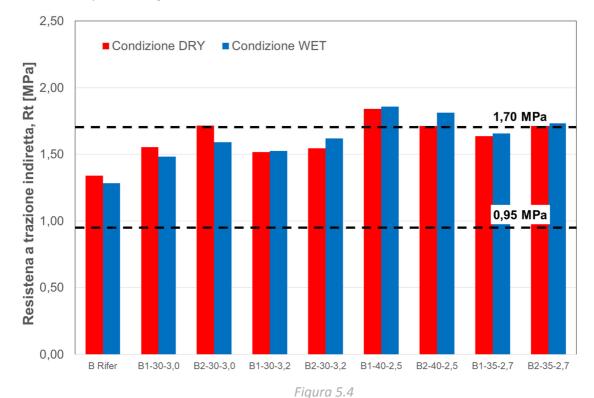
• Contenuto di vuoti residui in relazione al numero di giri e valori limite di capitolato (*Figura 5.2*).



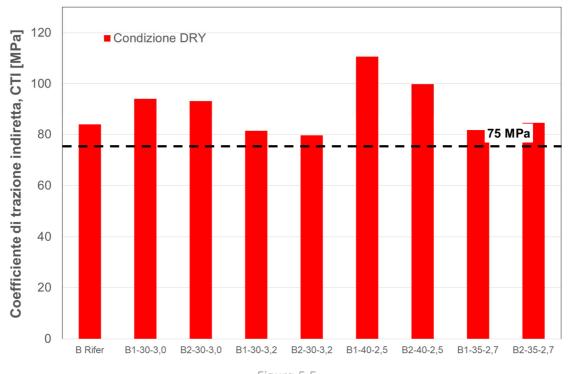
• Coefficiente angolare K della retta di compattabilità ci fornisce la lavorabilità della miscela (Figura 5.3)



• Valori medi della resistenza a trazione indiretta (ITS) delle miscele in condizioni Dry o Wet e valori limite di capitolato (*Figura 5.4*)



• Valori medi del coefficiente a trazione indiretta (CTI) delle miscele in condizioni Dry e valori limite di capitolato (*Figura 5.5*)



• Valori medi relativi alla suscettività all'acqua delle miscele e i limiti di capitolato (Figura 5.6)



6.CONCLUSIONI

L'indagine sperimentale svolta si è occupata pricipalmente dell'ottimizzazione delle diverse miscele realizzate con tecnologie a tiepido WMA, al variare del tipo di additivo chimico, percentuale di fresato e percentuale di bitume. Le miscele prodotte sono state confrontate con i limiti di capitolato.

Da un confronto dettagliato con la miscela tradizionale, prodotta con tecniche a caldo, si è notato come i provini confezionati WMA abbiano una percentuale di vuoti residui più alta. I parametri della prova a trazione indiretta (ITS, CTI, ITSR) risultano più alti rispetto alle tecniche a caldo, a causa della percentuale maggiore di fresato stradale.

Una volta analizzato ogni singolo specifico comportamento meccanico delle miscele per tipologia di prova, si sono elaborate le conclusioni:

- La compattabilità e la lavorabilità di una miscela sta ad indicare la facilità con cui essa viene stesa in cantiere. La presenza del fresato potrebbero ridurla tanto da rendere dispendioso il lavoro in sito. Con l'utilizzo degli additivi si è visto come la lavorabilità sia migliorata a temperature più basse.
- L'analisi della resistenza a rottura, eseguita realizzando la prova a trazione indiretta ITS, ha evidenziato un aumento della rigidezza in seguito all'utilizzo del fresato nelle miscele.

Osservando gli istogrammi riepilogativi del capitolo precedente si sono scelte due miscele WMA:

- B1-35-2.7
- B2-30-3.2

La scelta di queste due miscele è basata sui risultati delle prove di addensamento e di trazione indiretta ottimizzando al meglio le variabili.

Dai risultati ottenuti dalla compattabilità si può notare come l'additivo 1 permetta un miglior addensamento rispetto all'additivo 2 a pari temperature di compattazione. La percentuale di fresato

e di bitume aggiunto influenzano invece la lavorabilità e i vuoti residui; le due miscele scelte ottimizzano al meglio questi due parametri.

Per la trazione indiretta i provini delle miscele sono stati condizionati in acqua (wet) e in aria (dry), le due miscele scelte non hanno risentito fortemente del condizionamento in acqua, riportando valori di ITS pressocché simili. Il contenuto di fresato influisce direttamente sulle prestazioni meccaniche dei provini. All'aumentare della percentuale di fresato e la conseguente riduzione di bitume aggiunto si è notato un aumento della rigidità della miscela.

BIBLIOGRAFIA

- http://www.europarl.europa.eu
- Felice A. Santagata, "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol. 1 e vol.2