



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Il dosaggio del filler nei conglomerati bituminosi riciclati a freddo

The dosage of the filler in cold recycled bituminous mixtures

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Emiliano Prospero

Tesi di Laurea di:

Lorenzo Di Litta

Anno Accademico 2020 – 2021

Ai miei genitori e ai miei nonni

Sommario

Introduzione.....	1
Capitolo 1 - Stato dell'arte	3
1.1 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali.....	3
1.2 Riciclaggio a freddo.....	5
1.2.1 In impianto.....	5
1.2.2 In situ.....	6
1.3 Miscele riciclate a freddo.....	8
1.3.1 Aggregati.....	8
1.3.2 Filler	9
1.3.3 Leganti bituminosi	10
1.3.3.1 Bitume schiumato	10
1.3.3.2 Emulsione bituminosa	11
1.3.4 Cemento.....	13
1.3.5 Acqua	14
1.4 Requisiti di Capitolato.....	15
1.4.1 Conglomerato bituminoso di recupero	15
1.4.2 Aggregati di integrazione.....	16
1.4.3 Leganti.....	16
1.4.4 Acqua	17
1.4.5 Miscela di aggregati	17
1.4.6 Studio della miscela	17
1.4.7 Confronto con i requisiti del Capitolato ANAS	19
Capitolo 2 - Materiali utilizzati nella sperimentazione	20
2.1 Fresato	20

2.2	Filler calcareo	25
2.3	Emulsione bituminosa modificata con polimeri SBS	26
2.4	Cemento Portland	27
2.5	Acqua	28
Capitolo 3 - Programma sperimentale		29
3.1	Obiettivo della sperimentazione	29
3.2	Apparecchiature e protocolli di prova	29
3.2.1	Analisi granulometrica	29
3.2.2	Massa volumica apparente ed assorbimento d'acqua degli aggregati	33
3.2.2.1	Procedura per aggregati con granuli compresi tra 4 mm e 31,5 mm	36
3.2.2.2	Procedura per aggregati con granuli compresi tra 0,063 mm e 4 mm	37
3.2.3	Preparazione dei provini	38
3.2.4	Pressa a taglio giratoria	44
3.2.5	Determinazione delle proprietà volumetriche	51
3.2.5.1	Determinazione della massa volumica massima	51
3.2.5.2	Determinazione della massa volumica apparente	52
3.2.5.3	Determinazione del volume dei vuoti	52
3.2.6	Prova di modulo di rigidezza a trazione indiretta	53
3.2.7	Prova di rottura a trazione indiretta	62
3.3	Elaborazione dei dati del picnometro	65
3.4	Miscele di progetto degli aggregati	66
3.4.1	MIX 1	67
3.4.2	MIX 2	68

3.4.3	MIX 3	70
3.4.4	MIX 4	71
3.4.5	MIX 5	73
3.5	Miscele di progetto	74
3.5.1	Codifica provini	74
Capitolo 4 -	Analisi dei risultati	76
4.1	Curve di compattazione e parametri di lavorabilità	76
4.1.1	Impasto F0	77
4.1.2	Impasto F2.0	78
4.1.3	Impasto F3.5	79
4.1.4	Impasto F5.0	80
4.1.5	Impasto F6.5	81
4.1.6	Confronto.....	81
4.2	Perdita di acqua	82
4.2.1	Impasto F0	82
4.2.2	Impasto F2.0	83
4.2.3	Impasto F3.5	83
4.2.4	Impasto F5.0	84
4.2.5	Impasto F6.5	84
4.3	Proprietà volumetriche.....	85
4.3.1	Impasto F0	85
4.3.2	Impasto F2.0	86
4.3.3	Impasto F3.5	87
4.3.4	Impasto F5.0	88
4.3.5	Impasto F6.5	89
4.3.6	Confronto.....	90

4.4	Prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta.....	90
4.4.1	Impasto F0	91
4.4.2	Impasto F2.0	91
4.4.3	Impasto F3.5	92
4.4.4	Impasto F5.0	92
4.4.5	Impasto F6.5	93
4.4.6	Confronto.....	93
4.5	Prove di rottura a trazione indiretta.....	95
4.5.1	Impasto F0	95
4.5.2	Impasto F2.0	96
4.5.3	Impasto F3.5	96
4.5.4	Impasto F5.0	97
4.5.5	Impasto F6.5	97
4.5.6	Confronto.....	97
	Conclusioni	100
	Bibliografia	102
	Ringraziamenti.....	i

Introduzione

“Soddisfare i bisogni della generazione presente senza compromettere quelli della generazione futura” è il diktat dei nostri tempi. Nel corso degli ultimi decenni il settore dell’ingegneria civile e in particolare quello delle pavimentazioni stradali stanno focalizzando sempre più l’attenzione sulla ricerca di un modello di “sviluppo di tipo sostenibile”. Nel settore stradale il perseguimento di questo obiettivo assicura la preservazione degli aggregati vergini, la diminuzione della produzione di materiale di scarto, la conservazione dell’energia e la riduzione dell’inquinamento atmosferico.

Queste considerazioni hanno spinto ad affrontare una ricerca sperimentale sul riciclaggio a freddo volta a comprendere maggiormente l’influenza del filler sulle miscele di conglomerato bituminoso di recupero o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), determinando quali siano le percentuali che permettono di raggiungere le caratteristiche fisiche e meccaniche rispondenti al Capitolato Speciale d’Appalto per i Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano con un confronto relativo ai valori prescritti dal Capitolato ANAS.

La sperimentazione, condotta su cinque tipi di miscele, è stata sviluppata presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile e Architettura – Sezione Infrastrutture – Area Strade” dell’Università Politecnica delle Marche. La caratterizzazione fisica e meccanica è stata effettuata attraverso le seguenti prove:

- analisi granulometrica;
- determinazione della massa volumica ed assorbimento degli aggregati;
- valutazione delle proprietà volumetriche;
- modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- rottura a trazione indiretta (ITS).

La presente tesi è articolata in quattro capitoli:

1. *Stato dell'arte*

tratta il tema del riciclaggio a freddo delle pavimentazioni, con particolare attenzione ai requisiti dei materiali da impiegare nelle miscele stabiliti nel Capitolato Speciale d'Appalto per i Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano;

2. *Materiali utilizzati nella sperimentazione*

descrive i materiali usati nel confezionamento delle cinque miscele oggetto di studio e le loro caratteristiche;

3. *Programma sperimentale*

illustra l'obiettivo della sperimentazione, le procedure di laboratorio, il confezionamento dei provini e le miscele di progetto considerate;

4. *Analisi dei risultati*

riporta i risultati ottenuti dalle prove eseguite sui campioni esaminati con l'ausilio di tabelle e grafici relativi alle elaborazioni condotte che consentono una chiara e immediata lettura dei valori ottenuti.

Capitolo 1 - Stato dell'arte

1.1 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Le pavimentazioni stradali, a seconda della tipologia dei materiali utilizzati, si dividono in rigide, semirigide e flessibili. Quest'ultime sono caratterizzate da strati in conglomerato bituminoso (usura, binder e base) poggianti su uno strato di fondazione in misto granulare. Il conglomerato bituminoso è costituito da aggregati lapidei, filler, legante bituminoso ed eventuali additivi.

Negli ultimi decenni il riciclaggio in ambito stradale è diventato un argomento di grande rilievo. La componente principale delle miscele riciclate è il conglomerato bituminoso di recupero o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), cioè il materiale che si ottiene dalla fresatura oppure dalla scarifica degli strati in conglomerato bituminoso delle pavimentazioni stradali giunte alla fine della loro vita utile. L'utilizzo del RAP permette vantaggi sia ambientali che economici quali:

- riduzione della quantità di materiale portato in discarica;
- riutilizzo di risorse non rinnovabili al posto di aggregati vergini;
- limitazione dell'inquinamento dovuto al trasporto e all'incenerimento dei rifiuti;
- risparmio economico grazie ad un minor uso di materiali di primo impiego (aggregati e bitume) e alla limitazione dei costi di smaltimento;
- conservazione dell'energia.



Figura 1.1 - Fresato

Il fresato (figura 1.1) è il materiale prodotto dalla demolizione degli strati legati delle pavimentazioni stradali ammalorate con macchine fresatrici. Le frese (figura 1.2) più diffuse sono quelle a freddo, che consentono, durante l'asportazione, di ottenere una base planare con la sagoma richiesta per la stesura di un nuovo strato, raggiungendo opportuni valori delle quote e delle pendenze trasversali della pavimentazione sottostante. Queste macchine permettono una demolizione fino a 2 m di larghezza e 40 cm di profondità.



Figura 1.2 – Demolizione con fresatrice

Al fine di ottimizzare il riutilizzo dei materiali prodotti le fresatrici permettono la separazione delle varie tipologie di conglomerato bituminoso demolito in funzione della granulometria, natura degli aggregati e bitume impiegato. La quantità di grumi di conglomerato bituminoso varia in base allo stato della pavimentazione (temperatura, porosità, fessurazioni ecc.) e alla velocità di avanzamento della fresa. L'elemento cardine della fresatrice è il tamburo rotante dentato (figura 1.3) che ha il compito di frantumare gli strati legati.



Figura 1.3 - Tamburo di fresatura

La distribuzione granulometrica del fresato, a differenza di quella del conglomerato bituminoso di provenienza, è carente della parte fine (passante al setaccio da 0,5 mm) perché quest'ultima è inglobata nel bitume. Le proprietà del RAP derivano dalle caratteristiche dei materiali e del conglomerato bituminoso utilizzato nella vecchia pavimentazione stradale. Il riciclaggio del RAP viene classificato in funzione della temperatura del procedimento (a caldo e a freddo) e del luogo di confezionamento della miscela (in situ o in impianto).

1.2 Riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo consiste nel confezionamento di una miscela di conglomerato bituminoso in cui il RAP viene inserito a temperatura ambiente e non è riscaldato durante le fasi di produzione. I principali vantaggi di questa tecnica, rispetto a quella a caldo, sono:

- riduzione dell'impatto ambientale dovuto alla diminuzione dell'emissione di fumi, gas e polveri generati in fase di riscaldamento e trasporto;
- risparmio energetico per il mancato riscaldamento degli aggregati.

Il riciclaggio a freddo consente di usufruire di una percentuale di conglomerato bituminoso di recupero molto più elevata rispetto alla metodologia a caldo. Può essere effettuato in impianto oppure direttamente in situ.

1.2.1 In impianto

Gli impianti per il riciclaggio a freddo si dividono in fissi (figura 1.4) o semoventi (figura 1.5). Quest'ultimi sono composti da macchine mobili installate in cantiere.



Figura 1.4 - Impianto fisso per la produzione di conglomerato bituminoso riciclato a freddo



Figura 1.5 - Impianto mobile per la produzione di conglomerato bituminoso riciclato a freddo

In base al dosaggio degli aggregati gli impianti possono essere di tipo discontinuo o continuo. Nel primo caso gli inerti sono pesati prima di essere portati all'impianto di miscelazione mentre nel secondo l'immissione dei materiali è continua, ciò velocizza il processo produttivo a discapito dell'accuratezza del dosaggio.

La miscela è composta da aggregati, cemento, legante bituminoso e acqua. Una volta preparata può essere conservata nei silos di stoccaggio oppure portata in cantiere con i mezzi di trasporto. Alla stesa, eseguita mediante uso di vibrofinitrice, segue la compattazione con un rullo vibrante. Ultimato il costipamento, lo strato deve maturare per qualche giorno. In caso di pioggia è necessario proteggere il conglomerato bituminoso utilizzando un'emulsione a lenta rottura con un dosaggio di circa $1,5 \text{ kg/m}^2$ e successivo spargimento di graniglia o sabbia.

Con il riciclaggio in impianto si ha un controllo più efficace della produzione, in quanto il RAP viene vagliato e diviso in classi granulometriche. Stabilita la curva granulometrica di progetto si individuano gli eventuali aggregati vergini necessari per correggerla e i leganti bituminosi ottimali. Inoltre, nel caso di nuove costruzioni l'utilizzazione di un impianto per il riciclaggio a freddo consente l'impiego del conglomerato di recupero precedentemente stoccato.

1.2.2 In situ

Agli inizi degli anni '90 il riciclaggio in situ veniva realizzato con "treni ad unità multipla", una serie di macchinari che si differenziavano in base al tipo di intervento. Al giorno d'oggi si utilizzano le riciclatrici (figura 1.6), apparecchiature che svolgono contemporaneamente il

compito delle fresatrici e delle stabilizzatrici. Queste macchine, di notevoli dimensioni, sono montate sia su cingoli che su ruote gommate.



Figura 1.6 - Riciclatrice specializzata a freddo

La componente principale delle riciclatrici è il rotore di fresatura e miscelazione, composto da utensili da taglio per la frantumazione del conglomerato bituminoso. Per una maggiore omogeneità della miscela e per aumentare la produzione giornaliera si può optare per una demolizione prima con la fresatrice e successivamente una miscelazione con la riciclatrice. Il legante bituminoso (emulsione o bitume schiumato) e l'acqua sono iniettati nel vano di miscelazione (figura 1.7). Gli aggregati di integrazione e il cemento vengono solitamente posizionati sulla pavimentazione stradale ammalorata antistante la riciclatrice.

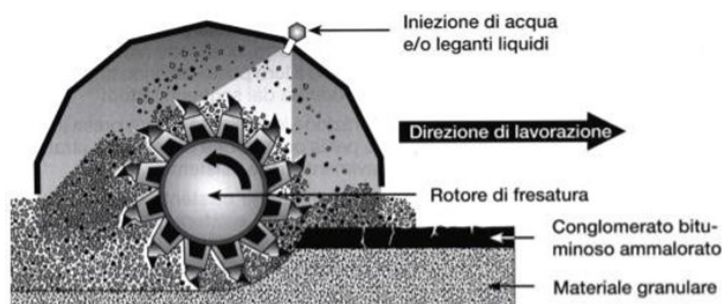


Figura 1.7 – Vano di miscelazione

Il riciclaggio a freddo in situ del conglomerato bituminoso consente principalmente di eliminare il trasporto verso il luogo del trattamento o di stoccaggio del materiale e a differenza di quello in impianto garantisce ulteriori vantaggi quali:

- una diminuzione dei costi di realizzazione della pavimentazione;
- un minor disagio alla circolazione dovuto ai brevi tempi di costruzione;
- una riduzione dell'impatto ambientale.

Costruendo con accurata precisione la pavimentazione stradale e controllando le fasi di miscelazione lo strato riciclato a freddo risulta più prestante rispetto al misto cementato (Chen, 2006, [16]).

1.3 Miscele riciclate a freddo

Le miscele riciclate a freddo sono costituite da:

- conglomerato bituminoso di recupero (RAP);
- aggregati per la correzione della curva granulometrica;
- filler;
- legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato);
- cemento;
- acqua.

Le miscele si dividono in chiuse, semichiuse, semiaperte e aperte in base alla percentuale dei vuoti a sua volta influenzata dalla granulometria degli inerti e della quantità di bitume. Per gli strati di base si prediligono miscele semiaperte, mentre per il manto di usura generalmente si preferiscono miscele chiuse caratterizzate da una bassa percentuale di vuoti, che garantiscono prestazioni più elevate e una maggiore vita utile.

1.3.1 Aggregati

Secondo la norma UNI-EN 13043 gli aggregati per conglomerati bituminosi possono essere naturali, industriali o riciclati. Gli aggregati naturali sono di origine minerale e sono sottoposti solo alla lavorazione meccanica. Quelli industriali subiscono un processo che comporta una modificazione termica o di altro tipo (termomeccanica o chimica). Gli aggregati riciclati derivano dalla lavorazione di materiali inorganici utilizzati in edilizia.

Nelle miscele riciclate a freddo la curva granulometrica del materiale si ottiene diversamente a seconda che si operi in impianto o in situ. Una volta vagliato il RAP, in impianto i campioni sono prelevati dai cumuli di stoccaggio mentre in situ si prendono successivamente al passaggio di idonea attrezzatura polverizzatrice (Pulvimixer, figura 1.8), ottima a sgranare i grumi di fresato di maggiori dimensioni, e senza la stesa dei leganti.



Figura 1.8 – Pulvimixer

Nel caso in cui la curva granulometrica di progetto non può essere individuata con il solo impiego di conglomerato bituminoso di recupero occorre correggerla integrando la miscela con aggregati vergini. Quando il fresato proviene dallo strato di usura e di binder la correzione della curva è relativa alla frazione grossa, quando si ottiene dagli strati di base solitamente risulta carente la frazione fine che resta inglobata nel bitume. La carenza degli aggregati fini sfavorisce lo sviluppo delle caratteristiche meccaniche.

1.3.2 Filler

Il filler è la frazione passante al setaccio da 0,063 mm secondo la normativa UNI EN 933-1 mentre ha dimensione massima pari a 0,075 mm per la norma CNR BU 139. Questo materiale può derivare dalla frantumazione degli aggregati oppure può essere costituito da polvere di roccia, cemento, calce idrata, calce idraulica, polvere di asfalto e ceneri volanti.

La funzione principale del filler è la correzione della curva granulometrica qualora sia insufficiente la frazione fine. Nei conglomerati bituminosi tale materiale, mescolandosi con il bitume, forma il mastice bituminoso.

È necessario un corretto dosaggio del filler nell'impasto in quanto un'eccessiva quantità incrementa la velocità a rottura dell'emulsione e aumenta la probabilità che gli aggregati di dimensioni maggiori non siano rivestiti completamente dal legante. Un quantitativo insufficiente non permette di ottenere la curva granulometrica di progetto.

1.3.3 Leganti bituminosi

I leganti bituminosi utilizzati nelle miscele a freddo sono il bitume schiumato e l'emulsione bituminosa.

1.3.3.1 Bitume schiumato

Il bitume schiumato, o bitume espanso, è uno specifico stato fisico del bitume caratterizzato da un'elevata superficie specifica e da una ridotta viscosità. La schiuma del bitume si ottiene spruzzando acqua a temperatura ambiente sul bitume riscaldato a circa 160-180°C nella camera di espansione. L'acqua, riscaldandosi per conduzione, passa dallo stato liquido a quello gassoso (vapore acqueo) e porta alla formazione di bolle di vapore coperte da una pellicola di bitume il cui volume aumenta di circa 20 volte rispetto a quello iniziale del bitume stesso. La schiuma si dissolve in meno di un minuto, trascorso il quale il legante riacquista le sue proprietà originali.

Per garantire la qualità del bitume schiumato è necessario ottimizzare la temperatura del processo e la quantità di acqua aggiunta. I parametri da valutare sono:

- il rapporto di espansione (expansion ratio);
- il tempo di dimezzamento (half life).

Il rapporto di espansione è il rapporto tra il massimo volume raggiunto allo stato schiumoso e il volume iniziale del bitume. Il tempo di dimezzamento è l'intervallo di tempo in cui la schiuma di bitume dimezza il suo volume dalla fine del processo di schiumatura.

L'ottimizzazione dei parametri di produzione si effettua in laboratorio seguendo un'apposita procedura. I valori minimi accettabili sono 20 per il rapporto di espansione e 25 s per il tempo di dimezzamento. Prima si sceglie il tipo di bitume e si fissa la temperatura, poi si valutano i due parametri. La procedura viene ripetuta a diverse temperature per determinare quella che garantisce le migliori prestazioni. Nella figura seguente è riportato un esempio di ottimizzazione eseguito in laboratorio in cui risulta che il valore ottimale di acqua è del 2,25% (figura 1.9).

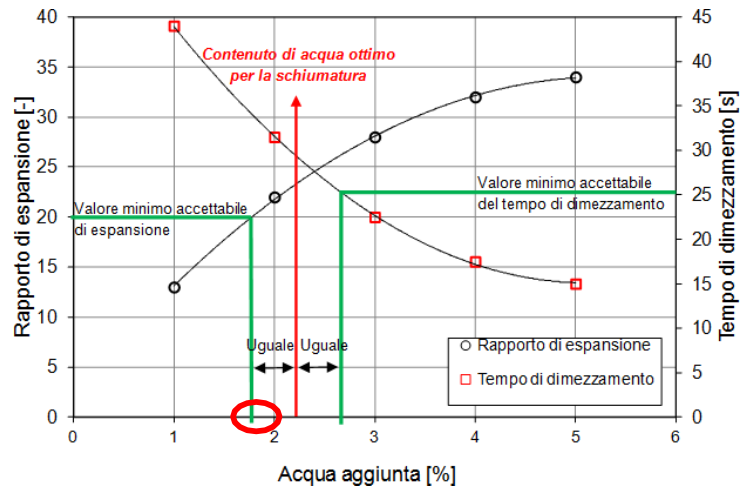


Figura 1.9 – Rapporto di espansione e tempo di dimezzamento

Un processo efficiente è caratterizzato da elevati valori del rapporto di espansione e del tempo di dimezzamento. Aumentando la quantità d'acqua, la dimensione delle bolle è maggiore e di conseguenza il rapporto di espansione cresce. Allo stesso tempo si riduce lo spessore della pellicola di bitume, provocando una perdita di stabilità e successiva diminuzione del tempo di dimezzamento.

La miscelazione del bitume schiumato con aggregati e cemento avviene in situ grazie a macchine riciclatrici. Durante questa fase il bitume si disperde e ingloba le particelle fini formando una malta bituminosa che lega gli aggregati più grossi.

1.3.3.2 Emulsione bituminosa

La composizione dell'emulsione bituminosa è caratterizzata da:

- l'acqua, che rappresenta la fase disperdente;
- il legante, che rappresenta la fase dispersa;
- gli agenti emulsionanti o tensioattivi, che favoriscono la dispersione del bitume in acqua controllandone la velocità di rottura.

Il bitume è un legante idrocarburico che ha la funzione di conferire alla miscela la necessaria coesione per poter resistere agli sforzi di flessione e taglio dovuti ai carichi da traffico veicolare. È un materiale termo-dipendente perché cambia la sua consistenza e viscosità in funzione della temperatura. Con il riscaldamento la viscosità del bitume diminuisce mentre la

lavorabilità aumenta. A temperatura ambiente è possibile utilizzare l'emulsione bituminosa per garantire un'adeguata lavorabilità.

Il bitume che ricopre il RAP è invecchiato a causa del riscaldamento in fase di miscelazione e stesa (invecchiamento a breve termine) e dell'azione degli agenti atmosferici e dei carichi stradali per tutta la vita utile della pavimentazione (invecchiamento a lungo termine). Per garantire buone prestazioni nella miscela si aggiunge l'emulsione bituminosa.

Le emulsioni bituminose fanno parte della categoria Oil-in-Water (O/W) dato che sono composte da una fase acquosa disperdente e una oleosa dispersa sotto forma di goccioline. In passato si utilizzavano bitumi ad elevata penetrazione (160/220 dmm) mentre al giorno d'oggi si emulsionano anche leganti più duri modificati con polimeri.

I tensioattivi sono composti chimici presenti con una percentuale che varia dallo 0,5 al 3%. Hanno una struttura molecolare formata da una catena idrocarburica non polare affine alla fase oleosa e un gruppo polare con proprietà idrofile. In base alla carica superficiale conferita al bitume i tensioattivi, così come le emulsioni, si dividono in anionici (carica superficiale negativa) e cationici (carica superficiale positiva). In ambito CEN solo le emulsioni cationiche sono oggetto di normazione perché sono molto più affidabili rispetto a quelle anioniche, le quali sono meno costose.

Sul mercato le emulsioni disponibili hanno una percentuale di bitume residuo pari al 50%, 55%, 60%, 65% o 69%. All'aumentare del contenuto d'acqua la miscela risulta più fluida.

Una volta avvenuta la miscelazione il bitume si separa dall'acqua andando a rivestire gli aggregati. Questo processo è caratterizzato dai meccanismi di rottura e presa (figura 1.10). La rottura dell'emulsione bituminosa si sviluppa in tre fasi distinte:

- decantazione (sedimentazione delle particelle di bitume);
- flocculazione (avvicinamento dei globuli sedimentati);
- coagulazione (fusione delle goccioline flocculate e formazione di un coagulo).

La velocità di rottura dipende da numerosi fattori quali:

- condizioni climatiche;
- temperatura dell'emulsione;
- modalità esecutive;
- proprietà degli aggregati (natura chimica, pulizia, ecc.).

In base alla velocità di rottura si distinguono emulsioni bituminose a:

- rottura super rapida (RR);
- rottura rapida (R);
- rottura media (M);
- rottura lenta (L);
- rottura sovrastabilizzata (LL).

Al termine della coagulazione avviene la presa, fenomeno in cui l'acqua è completamente eliminata e il bitume aderisce agli aggregati. Con il raggiungimento di questa fase aumenta la viscosità e diminuisce la lavorabilità.

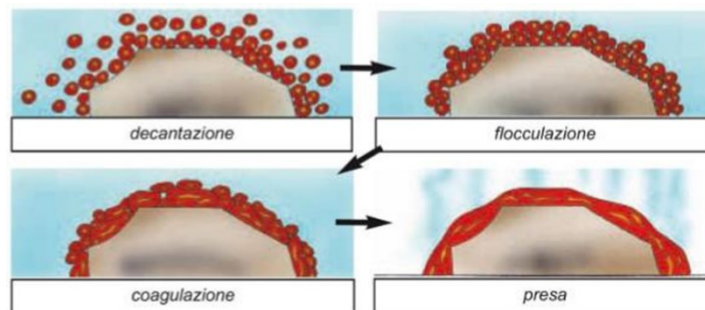


Figura 1.10 – Rottura e presa dell'emulsione bituminosa

Per le miscele riciclate a freddo di solito si impiegano emulsioni bituminose sovrastabilizzate perché, grazie ai lunghi tempi di rottura, permettono di gestire in modo migliore le fasi di miscelazione e compattazione. Inoltre, si prediligono le emulsioni cationiche modificate con il 60% di bitume residuo.

L'impiego dell'emulsione bituminosa, rispetto al bitume schiumato, garantisce maggiore sicurezza per gli addetti e flessibilità nella gestione dei tempi dato che non è richiesto il riscaldamento del legante.

1.3.4 Cemento

Il cemento è un legante idraulico. È una polvere grigia che, impastata con acqua, diventa deformabile. Successivamente inizia a solidificare portando ad un aumento della resistenza meccanica.

La tipologia di cemento più utilizzata nelle miscele riciclate a freddo è il cemento Portland, d'altoforno o pozzolanico, con classe di resistenza 32.5R. Il cemento Portland si ricava dalla

macinazione del clinker con il 5% circa di gesso biidrato in mulini rotanti contenenti sfere o barre di acciaio che sminuzzano il prodotto. La finezza delle polveri è molto importante per la reattività del cemento. Il clinker si ottiene tramite la cottura di calcare, argilla, sabbia, ceneri di pirite e altri componenti minori in un forno rotante a circa 1450°C.

Il processo, costituito dalle reazioni chimiche che avvengono tra il cemento e l'acqua, è noto come idratazione del cemento (figura 1.11). La pasta cementizia (cemento + acqua), dopo il contatto con l'acqua, diventa più consistente e perde la sua deformabilità iniziale. Poi irrigidisce sviluppando elevata resistenza meccanica. Queste due fasi sono chiamate presa e indurimento.

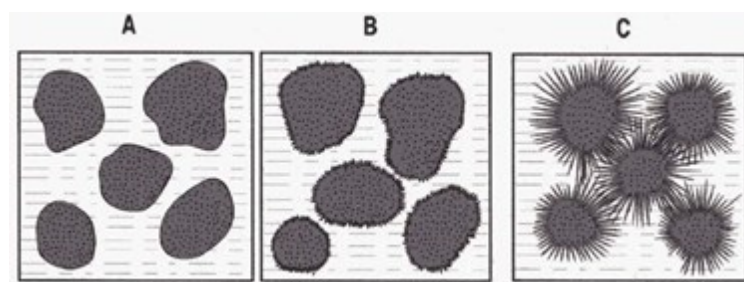


Figura 1.11 – Processo d'idratazione del cemento

La qualità della matrice cementizia dipende dal rapporto acqua/cemento, dal tipo di cemento utilizzato e dalla temperatura. Quasi tutti i cementi sviluppano le caratteristiche ottimali a temperatura ambiente, all'incirca tra 10°C e 30°C. Al di fuori di questo intervallo la presa e l'indurimento sono modificati. Un abbassamento della temperatura rallenta la presa del cemento provocando una riduzione della resistenza meccanica alle brevi stagionature. Mentre un aumento della temperatura velocizza la presa causando una perdita di lavorabilità.

Per le miscele riciclate a freddo il quantitativo ottimale di cemento è intorno al 1-3% rispetto alla massa degli aggregati. Questo materiale influenza le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche delle miscele. La funzione principale del cemento è l'aumento della resistenza. In caso di assenza di acqua il cemento si comporta come un filler inerte.

1.3.5 Acqua

L'acqua impiegata nelle miscele a freddo deve essere esente da sostanze nocive che possono influire negativamente sulle prestazioni della miscela stessa. Non devono essere presenti oli,

acidi, alcali e altre impurità dannose. Per i conglomerati bituminosi riciclati a freddo il quantitativo di acqua ottimale è intorno al 5-7% rispetto alla massa degli aggregati.

L'acqua presente nella miscela deriva:

- dall'acqua contenuta nell'emulsione bituminosa;
- dall'umidità del fresato, variabile a seconda delle condizioni atmosferiche;
- dall'acqua di aggiunta prima della miscelazione.

L'acqua è una componente fondamentale per le miscele di conglomerato bituminoso perché regola la lavorabilità, l'addensamento, i meccanismi di rottura dell'emulsione, la presa e l'indurimento del cemento e i tempi di riapertura al traffico.

Un quantitativo di acqua superiore a quello corretto porterebbe ad un aumento della lavorabilità a discapito dell'addensamento, causando la riduzione della durata della miscela e delle proprietà meccaniche (Viola, 2013, [22]).

1.4 Requisiti di Capitolato

Di seguito vengono illustrate le prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano riguardanti i conglomerati bituminosi riciclati a freddo per la realizzazione di strati di base delle pavimentazioni stradali e un relativo confronto con quelle del Capitolato ANAS.

1.4.1 Conglomerato bituminoso di recupero

Il conglomerato bituminoso di riciclo proviene dalla demolizione (anche parziale) di pavimentazioni stradali o aeroportuali, eseguita con fresatrici o con altri tipi di macchine come gli escavatori. Utilizzando le pale meccaniche è necessario successivamente un processo di frantumazione per la riduzione delle dimensioni. Se la miscelazione avviene in impianto il conglomerato bituminoso di recupero deve essere vagliato per eliminare grumi di dimensioni superiori alla massima prevista dalla miscela. Questa operazione non è prevista con la miscelazione in sito tramite Pulvimixer. L'analisi granulometrica del conglomerato deve essere effettuata sul materiale vagliato in impianto mentre in sito dopo il passaggio del Pulvimixer.

1.4.2 Aggregati di integrazione

Quando la curva granulometrica di progetto non può essere ottenuta soltanto con il fresato è necessario correggerla integrando la miscela con aggregati vergini. Gli aggregati impiegati devono essere qualificati in conformità al Regolamento (UE) N. 305/2011 sui prodotti da costruzione e devono presentare la marcatura CE attestante la conformità all'appendice ZA della Norma Europea Armonizzata UNI EN 13043. Gli aggregati grossi e fini devono soddisfare i requisiti indicati nelle due tabelle 1.1 e 1.2.

AGGREGATO GROSSO					
Requisito	Norma	Simbolo	Unità di misura	Valori richiesti	Categoria
Resistenza alla frammentazione (Los Angeles)	UNI EN 1097-2	LA	%	≤30	LA ₃₀
Percentuale di particelle frantumate	UNI EN 933-5	C	%	100	C _{100.0}
Dimensione Max	UNI EN 933-1	D	mm	31,5	-
Passante allo 0.063	UNI EN 933-1	f	%	≤1	f ₁
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	F	%	≤1	F ₁
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3	FI	%	≤30	FI ₃₀
Assorbimento d'acqua	UNI EN 1097-6	WA ₂₄	%	≤1,5	WA ₂₄ 2

Tabella 1.1 - Requisiti aggregati grossi

AGGREGATO FINE					
Requisito	Norma	Simbolo	Unità di misura	Valori richiesti	Categoria
Equivalentente in sabbia	UNI EN 933-8	ES	%	≥60	-
Quantità di frantumato			%	100	-
Passante allo 0.063	UNI EN 933-1	f	%	≤2	f ₂
Indice di plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892-12	IP		NP	-
Limite Liquido	UNI CEN ISO/TS 17892-12	LL	%	≤25	-

Tabella 1.2 - Requisiti aggregati fini

1.4.3 Leganti

Il bitume presente nei conglomerati di recupero deve essere integrato con quello presente nell'emulsione bituminosa modificata con polimeri. Per il riciclaggio a freddo è necessaria un'emulsione cationica a rottura lenta con il 60% di bitume residuo che soddisfi le specifiche presenti nella tabella 1.3.

EMULSIONE DI BITUME MODIFICATO C60BP10					
Requisito	Norma	Simbolo	Unità di misura	Valori richiesti	Classe
Contenuto di acqua	UNI EN 1428	W	%	40+/-1	-
Contenuto di bitume	UNI EN 1428	r	%	60+/-1	6
Contenuto flussante	UNI EN 1431	-	%	0	-
Sedimentazione a 7gg	UNI EN 12847	ST	%	≤10	3
pH (grado di acidità)	UNI EN 12850	pH		2 - 4	-
Miscelazione con cemento	UNI EN 12848		%	< 2	10
<i>Residuo bituminoso (per evaporazione)</i>					
Penetrazione a 25 °C	UNI EN1426	-	0,1 mm	50-70	3
Punto di rammollimento	UNI EN1427	-	°C	> 60	2
Punto di rottura (Frass)	UNI EN 12593	-	°C	< -13	-
Ritorno elastico a 25 °C	UNI EN 13398	R _E	%	≥ 50	5

Tabella 1.3 - Requisiti emulsioni bituminose modificate

Il cemento deve essere conforme al Regolamento prodotti da costruzione 305/2011/CPR con dichiarazione di prestazione (DoP) e deve presentare la marcatura CE attestante la conformità all'appendice ZA della norma europea armonizzata UNI EN 13282-1 e UNI EN 13282-2.

1.4.4 Acqua

L'acqua, conforme alla norma UNI EN 1008, deve essere priva di impurità dannose.

1.4.5 Miscela di aggregati

La curva granulometrica di progetto deve essere compresa nel fuso indicato nella tabella 1.4.

Serie setacci ISO	Passanti cumulativi
mm	%
80	100
63	95-100
40	85-100
22.5	70-95
10	50-75
4	30-42
2	20-35
0.5	10-18
0.063	4-8

Tabella 1.4 - Fuso granulometrico

1.4.6 Studio della miscela

Il mix design di laboratorio permette di determinare la curva granulometrica di progetto, considerando l'eventuale integrazione di aggregati, e le percentuali ottimali di emulsione bituminosa modificata con polimeri, cemento e acqua. Si individua il corretto contenuto di acqua nella miscela granulare con il 2% in peso di cemento, seguendo le indicazioni della tabella 1.5.

Cemento [%]	2,0					
Acqua [%]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Provini [n°]	3	3	3	3	3	3

Tabella 1.5 - Contenuto ottimale di acqua con 2% di cemento

Le condizioni di prova relative alla compattazione eseguita mediante pressa giratoria (UNI EN 12697-31) sono di seguito elencate.

- Tipo di fustella: NON drenata
- Angolo di rotazione: $1.25^\circ \pm 0.02^\circ$

- Velocità di rotazione: 30 giri al minuto
- Pressione verticale: 600 kPa
- Diametro provino: 150 mm
- N° giri: 100

Deve essere eliminato il trattenuto al setaccio da 20 mm nel caso in cui gli elementi più grossolani impediscano la produzione di provini geometricamente regolari.

I provini vengono pesati prima e dopo la compattazione per la determinazione della quantità di acqua espulsa e successivamente essiccati in stufa a 40°C fino a peso costante. La percentuale ottimale di acqua è quella che permette di raggiungere il valore più elevato di massa volumica della miscela secca (UNI EN 12697-6/procedura D) e un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione minore dello 0,5%.

Una volta individuato il corretto contenuto di acqua, i provini vengono confezionati mediante la stessa procedura di compattazione, ma con differenti quantità (percentuali riferite al peso degli inerti) di cemento ed emulsione bituminosa modificata con polimeri come indicato nella tabella 1.6.

Acqua [%]	Contenuto ottimale								
Cemento [%]	1,5			2,0			2,5		
Emulsione bituminosa [%]	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0
Provini [n°]	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tabella 1.6 - Confezionamento dei provini in base alle diverse percentuali di cemento e di emulsione bituminosa

Per un corretto studio della miscela è importante considerare anche l'acqua apportata dall'emulsione.

I provini, maturati per 72 ore a 40 °C e dopo condizionamento per ulteriori 4 ore in camera climatica a 25 °C, sono sottoposti alla prova di resistenza a trazione indiretta (UNI EN 12697/23). Su quelli che presentano un valore di ITS > 0,35 MPa (resistenza a trazione indiretta) si determinano:

- il modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (spostamento orizzontale imposto $5 \pm 0.2 \mu\text{m}$) secondo la Norma UNI EN 12697/26;
- la perdita di resistenza dopo imbibizione a 25 °C per 1 ora sottovuoto a 50 mm di mercurio.

La miscela ottimale di progetto è quella che fornisce il modulo di rigidezza a 20°C più piccolo tra quelli che risultano maggiori di 3,0 GPa e resistenza a trazione indiretta dopo imbibizione maggiore del 70% di quella ottenuta su provini non immersi in acqua.

1.4.7 Confronto con i requisiti del Capitolato ANAS

In questo paragrafo vengono illustrati i requisiti di accettazione dell'ente ANAS relativi alla caratterizzazione meccanica delle miscele in conglomerato bituminoso riciclato a freddo.

La resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, testato dopo tre giorni, deve risultare compresa tra 0,32 e 0,55 MPa. I provini devono essere maturati a 40°C e condizionati a 25°C per quattro ore prima della rottura.

Il limite inferiore del modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta è analogo a quello previsto dalle prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano e cioè pari a 3,0 GPa.

Capitolo 2 - Materiali utilizzati nella sperimentazione

Nel presente capitolo vengono descritti i materiali impiegati nel confezionamento delle cinque miscele riciclate a freddo oggetto della sperimentazione quali:

- tre tipologie di fresato;
- filler calcareo;
- emulsione bituminosa modificata con polimeri SBS;
- cemento Portland;
- acqua.

2.1 Fresato

Nella sperimentazione sono stati campionati tre differenti fresati identificati con le lettere A, B e C. I fresati A e C provengono da due distinti impianti di produzione del conglomerato bituminoso, mentre quello B deriva dalla dismissione di una pavimentazione sita sulla SS3 in località Acqualagna (PU). Quest'ultimo è stato ottenuto mediante il passaggio della fresatrice e successivamente del Pulvimixer. Il fresato C è stato prodotto in laboratorio mediante setacciatura di un campione con lo scopo di selezionare gli aggregati con granulometria compresa tra 16 e 20 mm. La caratterizzazione di questi materiali è stata svolta attraverso la prova di analisi granulometrica descritta nella normativa UNI EN 933-1.



Figura 2.1 - Campione di Fresato A

Campione	Fresato A
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]
31,5	100
20	100
16	97,8
10	87,1
8	79
4	54,4
2	34,1
1	19,6
0,5	10,7
0,25	6
0,125	2,9
0,063	1,8
Fondo	0

Tabella 2.1 - Analisi granulometrica del Fresato A

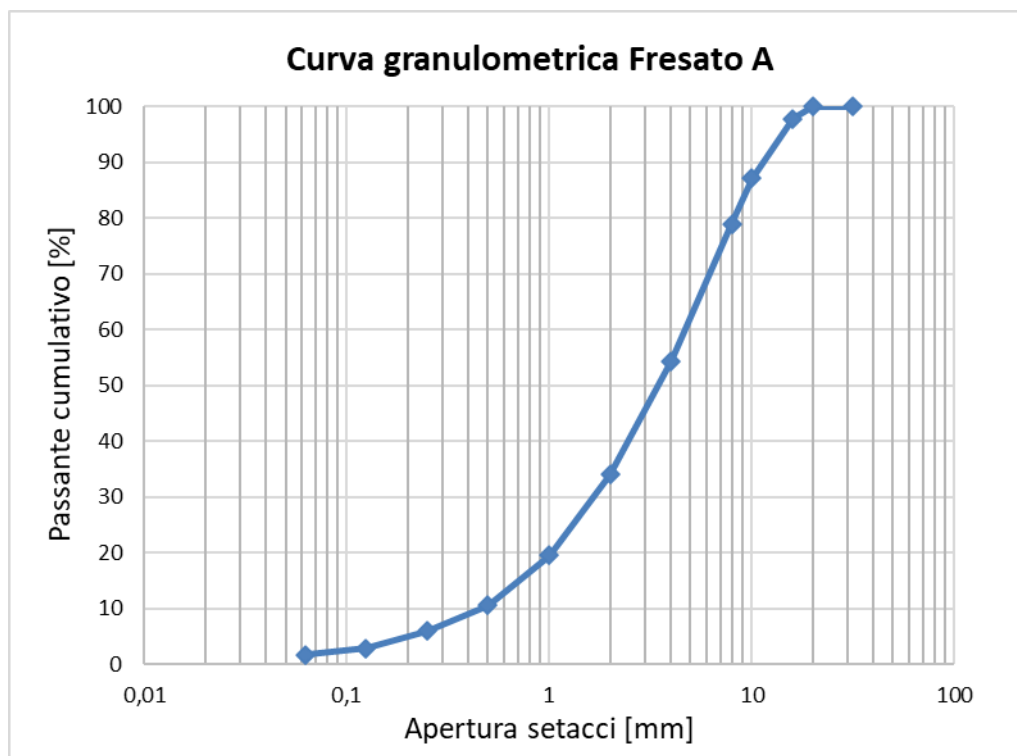


Figura 2.2 - Curva granulometrica del Fresato A

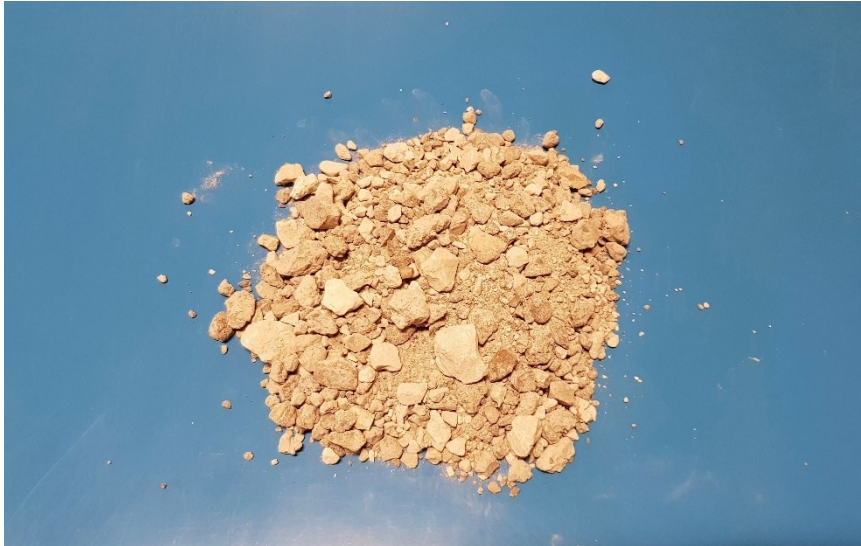


Figura 2.3 - Campione di Fresato B

Campione	Fresato B
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]
31,5	100
20	100
16	97,4
10	89,9
8	82,7
4	59,5
2	41,4
1	28,8
0,5	21
0,25	17,1
0,125	12,2
0,063	8,4
Fondo	0

Tabella 2.2 - Analisi granulometrica del Fresato B

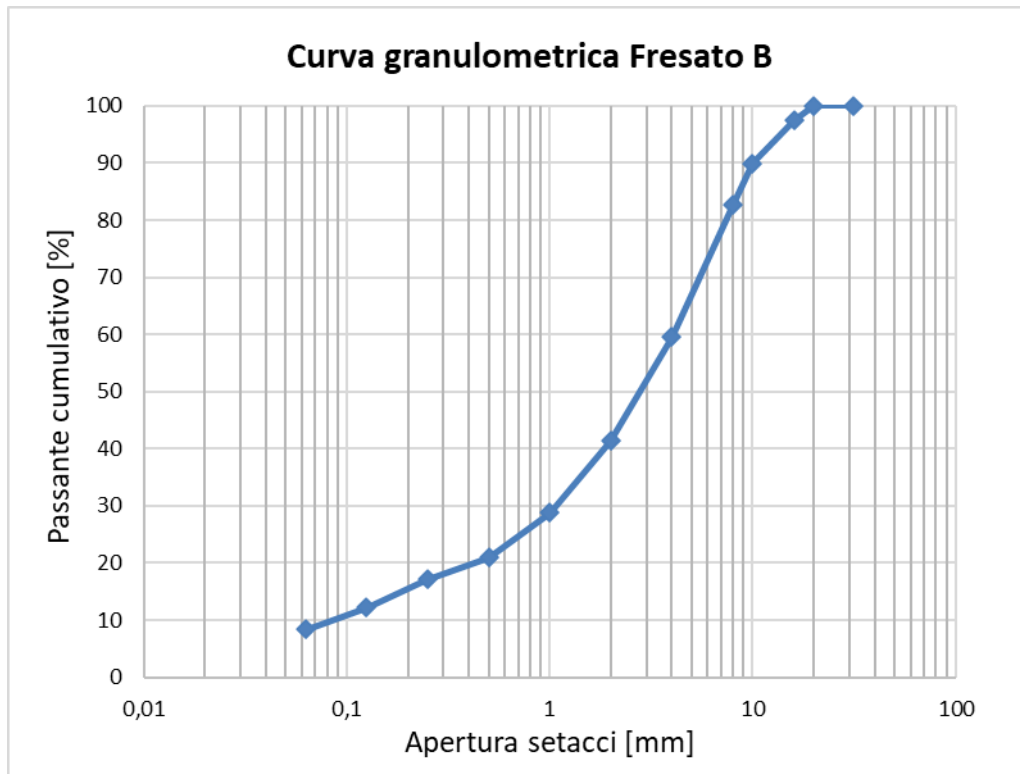


Figura 2.4 - Curva granulometrica del Fresato B



Figura 2.5 - Campione di Fresato C

Campione	Fresato C
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]
31,5	100
20	100
16	0
10	0
8	0
4	0
2	0
1	0
0,5	0
0,25	0
0,125	0
0,063	0
Fondo	0

Tabella 2.3 - Analisi granulometrica del Fresato C

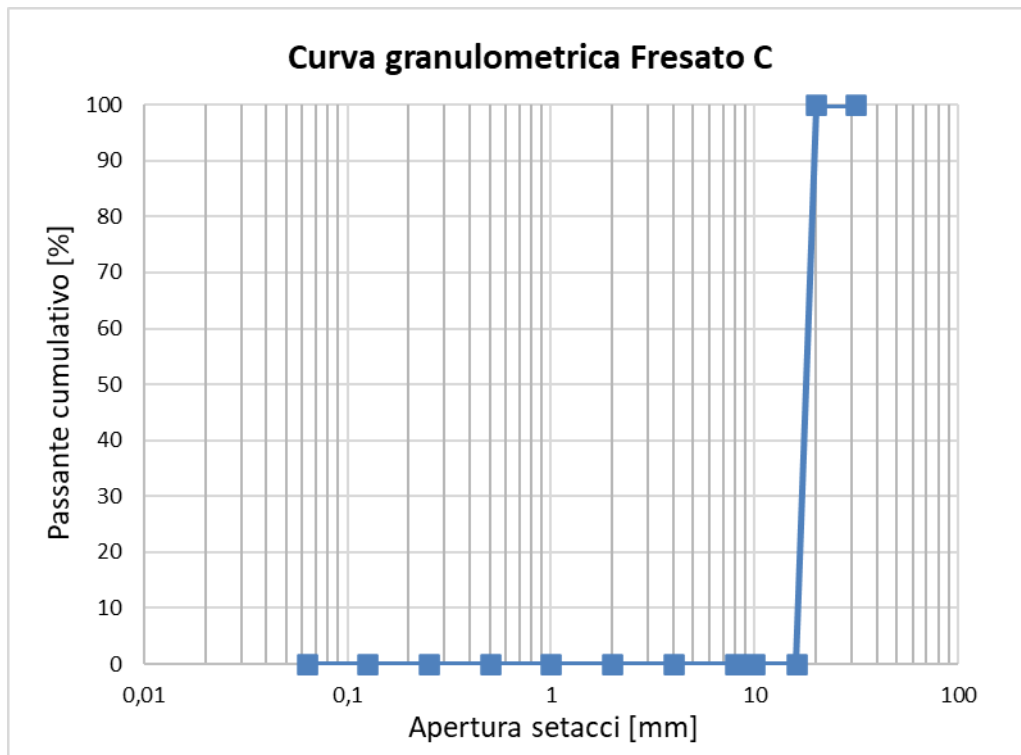


Figura 2.6 - Curva granulometrica del Fresato C

2.2 Filler calcareo

Il filler, secondo la normativa UNI EN 933-1, è la frazione passante al setaccio da 0,063 mm. Il filler calcareo, impiegato nella sperimentazione, è chimicamente inerte. Differente rispetto a quello in cemento il quale, reagendo con acqua, modifica le proprietà volumetriche e meccaniche della miscela. In seguito, vengono presentati i risultati dell'analisi granulometrica condotta sul filler calcareo.



Figura 2.7 – Campione di Filler calcareo

Campione	Filler calcareo
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	100
0,25	98,6
0,125	90,2
0,063	77,6
Fondo	0

Tabella 2.4 – Analisi granulometrica del Filler calcareo

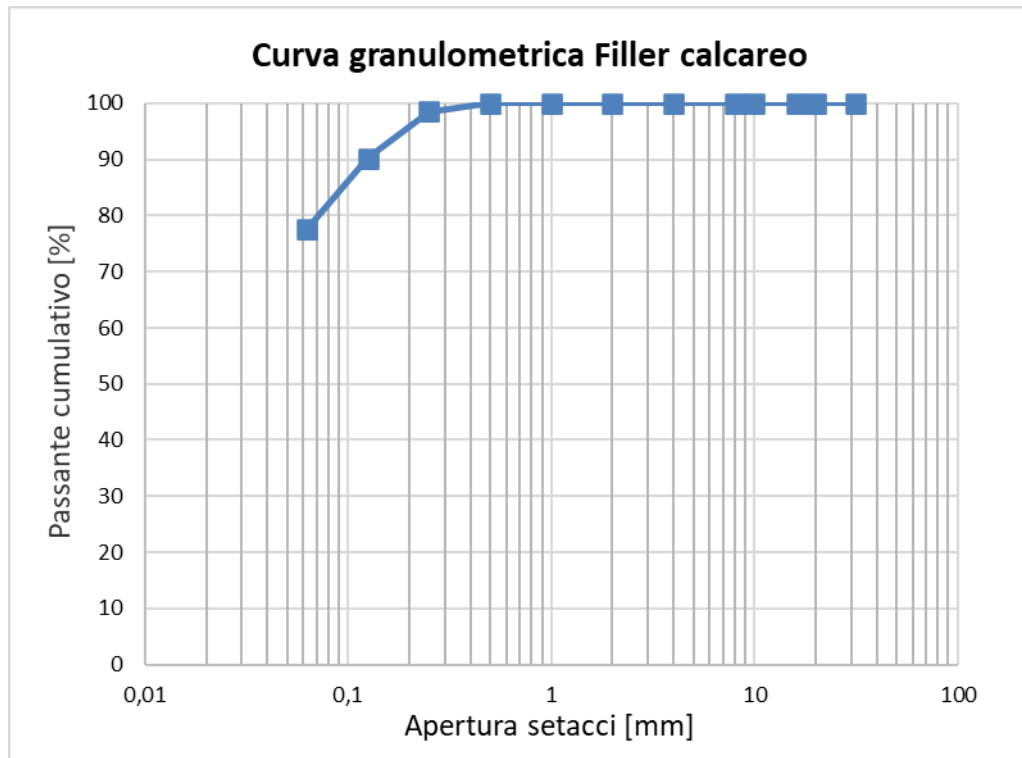


Figura 2.8 – Curva granulometrica del Filler calcareo

2.3 Emulsione bituminosa modificata con polimeri SBS

L'emulsione bituminosa è costituita dalla dispersione di un legante bituminoso in acqua. Nella sperimentazione è stata utilizzata l'emulsione RIGEVAL CM (figura 2.9), prodotta dalla ditta Valli Zabban.



Figura 2.9 – Emulsione RIGEVAL CM

Si tratta di un'emulsione bituminosa modificata con polimeri SBS (stirene-butadiene-stirene) per conglomerati bituminosi riciclati a freddo prodotti in impianto. La scheda tecnica viene presentata nella tabella 2.5.

Sito produttivo	Stabilimento di Bologna	Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna			
Designazione	C60BP10				
Descrizione del prodotto	Polymer Modified Bitumen in emulsione acquosa per conglomerati bituminosi riciclati a freddo prodotti in impianto.				
Caratteristiche dell'emulsione					
	Metodo	U.d.M.	min	Prestazione max	Classe
Contenuto di legante	UNI EN 1428	%	58	62	6
Stabilità alla miscelazione con il cemento	UNI EN 12848	%		2	10
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm)	UNI EN 12846	sec	15	70	3
Adesività	UNI EN 13614	%	90		3
Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074)					
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		70	3
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	65		2
Coesione Force ductility test a 10°C	UNI EN 13589 UNI EN 13703	J/cm ²	2		6
Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C	UNI EN 13398	%	75		4

Tabella 2.5 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGIVAL CM

Gli elastomeri, contenuti nell'emulsione, sono copolimeri formati da blocchi di mono-olefine e di-olefine. Sono composti da lunghe sequenze di un monomero unite a lunghe sequenze di un altro monomero. Nei polimeri SBS la mono-olefina è lo stirene e la di-olefina è il butadiene. Lo stirene conferisce rigidità mentre il butadiene elasticità.

2.4 Cemento Portland

Il cemento Portland è un legante idraulico. La tipologia di cemento impiegata nella miscela riciclata a freddo è il cemento Portland con classe di resistenza 32.5R (figura 2.10). La resistenza a compressione minima garantita a due giorni è 10 N/mm² mentre a 28 giorni è 32,5 N/mm². La sigla R si riferisce al comportamento alle brevi stagionature. R sta per rapido indurimento.



Figura 2.10 – Campione di Cemento Portland 32,5

2.5 Acqua

Il contributo totale di acqua nella fase di miscelazione della sperimentazione è dato dalla somma dell'acqua di assorbimento e dell'acqua di aggiunta. L'acqua di assorbimento deve essere inserita nella miscela almeno 12 ore prima della preparazione dei provini affinché gli aggregati abbiano il tempo di assorbirla. Questa procedura è necessaria in quanto se si aggiungesse tutta l'acqua in fase di impasto, la stessa non avrebbe il tempo di essere assorbita dall'aggregato e verrebbe in parte espulsa in fase di compattazione. Un'eccessiva espulsione comporterebbe un impasto finale con un minor quantitativo di acqua e di conseguenza un peggioramento prestazionale del provino.

Capitolo 3 - Programma sperimentale

In questo capitolo vengono illustrati l'obiettivo della sperimentazione, le strumentazioni impiegate, i protocolli di prova e le miscele oggetto di studio.

3.1 Obiettivo della sperimentazione

L'indagine sperimentale proposta in questa dissertazione è stata condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura – Sezione Infrastrutture – Area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche. La ricerca eseguita mediante prove di laboratorio su cinque miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo, preparate con differenti quantità di filler calcareo (0%, 2%, 3.5%, 5%, 6.5%), è stata svolta al fine di determinare le percentuali di quest'ultimo che permettono ai campioni di raggiungere la caratterizzazione fisica e meccanica rispondente al Capitolato Speciale d'appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano e a quello ANAS.

3.2 Apparecchiature e protocolli di prova

Il seguente paragrafo illustra le metodologie di prova e le strumentazioni impiegate nell'ambito dell'attività sperimentale intrapresa.

3.2.1 Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è una prova di laboratorio, descritta dalla normativa UNI EN 933-1, utile per valutare la distribuzione delle dimensioni degli aggregati che compongono una miscela. La granulometria degli inerti influenza la lavorabilità, le proprietà volumetriche, la durabilità, il grado di compattezza e la risposta meccanica del conglomerato bituminoso. In questa prova si sottopone un campione rappresentativo degli aggregati ad un processo di vagliatura.

Inizialmente avviene la rimozione del passante al setaccio da 0,063 mm per "ripulire" il materiale grosso dal filler attaccato. L'operazione si rende necessaria per evitare la sovrastima della pezzatura più grande rispetto al passante al setaccio da 0,063 mm. Successivamente si

dispone una pila di setacci a maglie quadrate (figura 3.1), chiamati stacci, con dimensioni decrescenti dall'alto verso il basso.



Figura 3.1 - Setaccio a maglia quadrata

Le aperture dei setacci, corrispondenti alla diagonale della maglia quadrata, impiegate nella sperimentazione sono individuate nella tabella 3.1.

Apertura setacci [mm]
31,5
20
16
10
8
4
2
1
0,5
0,25
0,125
0,063
Fondo

Tabella 3.1 - Aperture dei setacci

Una quantità nota di campione viene collocata sulla sommità della pila di setacci comprensiva di fondo e quest'ultima viene posizionata in un vibrovaglio (figura 3.2). Questa apparecchiatura con un'azione meccanica orizzontale facilita la vagliatura.



Figura 3.2 - Pila di setacci impiegata per ottenere il Fresato C posizionata nel vibro-vaglio

Terminate le operazioni di vagliatura si determina quanto segue:

- la massa in grammi del materiale trattenuto ad ogni setaccio;
- il trattenuto parziale nei vari setacci espresso in percentuale rispetto al peso totale del campione;
- il trattenuto cumulativo negli stacci corrispondente alla quantità di materiale contenuta nel setaccio considerato ed in quelli sovrastanti espressa in percentuale rispetto al peso totale del campione;
- il passante cumulativo di ogni setaccio che rappresenta la quantità di aggregati che superano il vaglio considerato espressa in percentuale rispetto al peso totale del campione.

Campione	Fresato B			
	Apertura setacci [mm]	Trattenuto parziale [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
31,5	0	0	0	100
20	0	0	0	100
16	34,5	2,6	2,6	97,4
10	100	7,5	10,1	89,9
8	96,15	7,2	17,3	82,7
4	307,75	23,2	40,5	59,5
2	239,75	18,1	58,6	41,4
1	167,45	12,6	71,2	28,8
0,5	103,8	7,8	79	21
0,25	52	3,9	82,9	17,1
0,125	64,9	4,9	87,8	12,2
0,063	50,5	3,8	91,6	8,4
Fondo	109,55	8,3	100	0
Peso totale Inerte [g]	1326,35			

Tabella 3.2 – Analisi granulometrica condotta su un campione di Fresato B

I risultati dell'analisi granulometrica possono essere rappresentati mediante una curva granulometrica (figura 3.3), grafico nel quale si riportano sull'asse delle ordinate i valori dei passanti cumulativi in scala aritmetica e sull'asse delle ascisse le dimensioni delle aperture dei setacci in scala logaritmica.

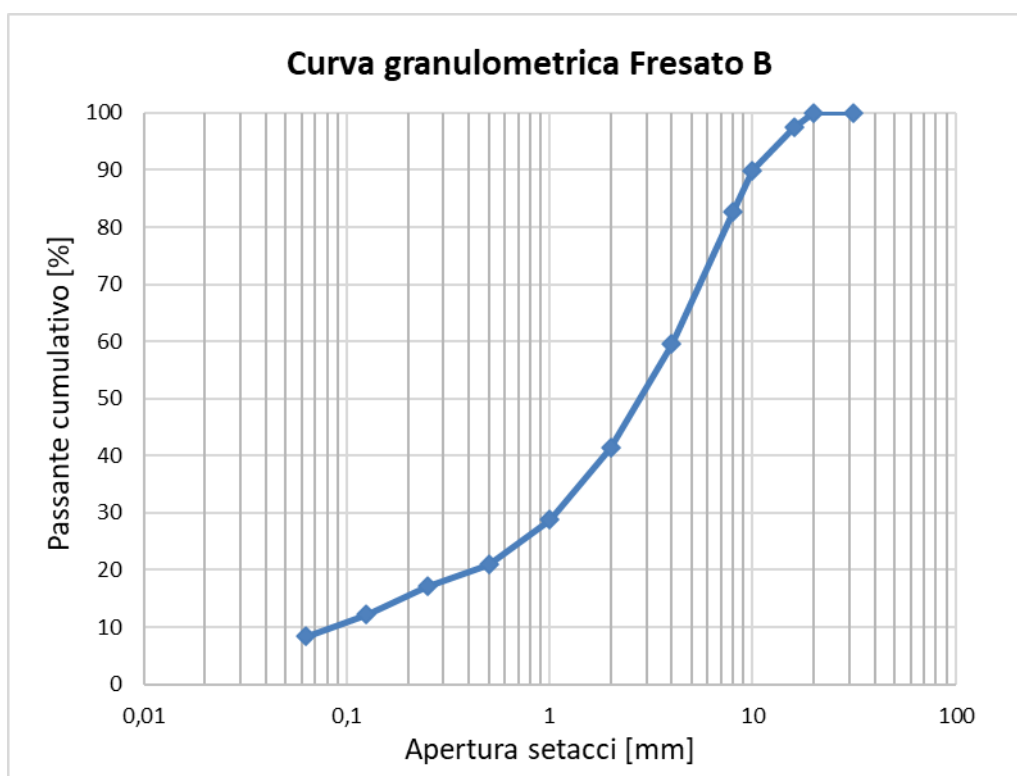


Figura 3.3 – Curva granulometrica Fresato B

3.2.2 Massa volumica apparente ed assorbimento d'acqua degli aggregati

La massa volumica apparente e l'assorbimento d'acqua degli aggregati, descritti dalla normativa UNI-EN 1097-6, si determinano con l'impiego di un picnometro (figura 3.4).

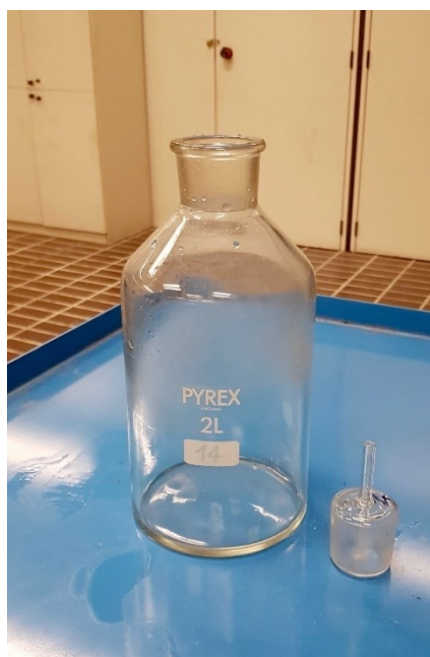


Figura 3.4 - Picnometro

Il picnometro è un piccolo recipiente di vetro che ha un tappo dotato di capillare e un riferimento per definire il livello di liquido costante.

Inizialmente si prende una porzione rappresentativa di aggregati, i quali vengono lavati per eliminare la frazione fine passante al setaccio con aperture da 0,063 mm. Il campione di materiale viene setacciato in due differenti pezzature:

- da 4 mm a 31,5 mm;
- da 0,063 mm a 4 mm.

Gli aggregati suddivisi vengono inseriti in due picnometri differenti riempiti con acqua condizionata a $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$ fino a sommergerli. Le bolle d'aria rimaste intrappolate si rimuovono sia agitando prudentemente il picnometro tenuto in posizione inclinata che attraverso una pompa a vuoto (figura 3.5).

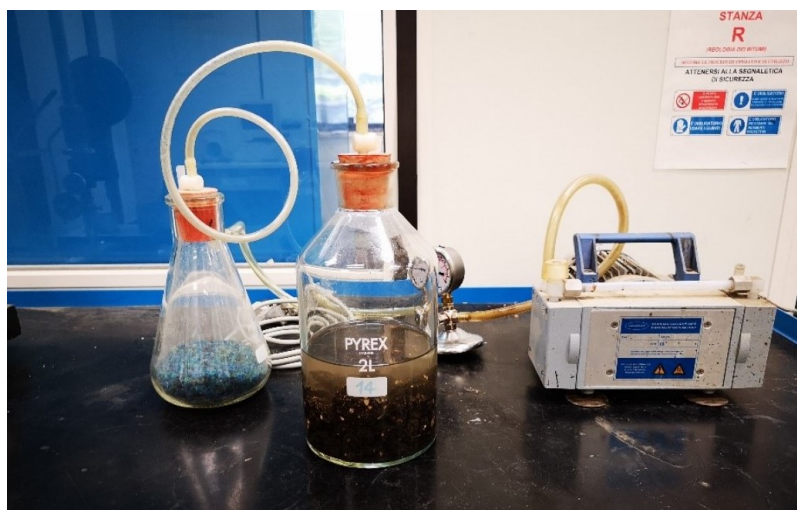


Figura 3.5 – Pompa a vuoto collegata al picnometro

I picnometri vengono inseriti in una camera climatica. Il giorno successivo, si eliminano di nuovo le bolle d'aria mediante uso di pompa a vuoto. Poi si posiziona il tappo su ogni picnometro, lo si riempie con acqua fino alla tacca di riferimento e si misura la massa M_2 con una bilancia (figura 3.6).

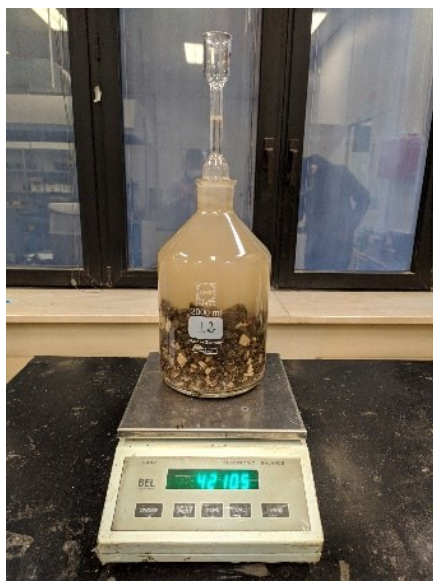


Figura 3.6 - Misurazione della massa M2

La misura della temperatura dell'acqua T1, utile per ricavare la massa volumica dell'acqua ρ_w , si effettua con un termometro ad ago (figura 3.7). È necessario verificare che sia compresa tra 19 e 25°C.

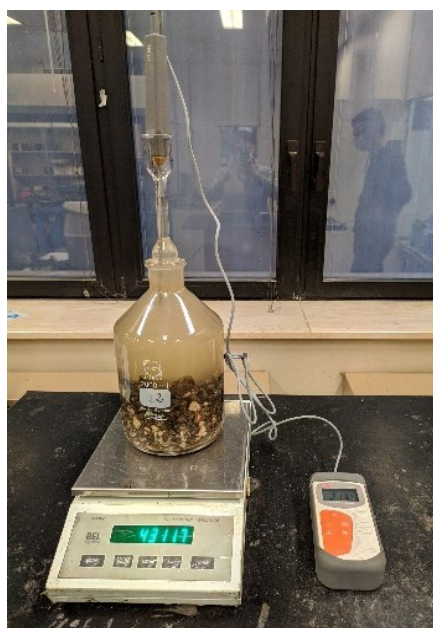


Figura 3.7 - Misurazione della temperatura T1

La procedura di determinazione dell'assorbimento d'acqua degli aggregati si differenzia a seconda della pezzatura considerata.

3.2.2.1 Procedura per aggregati con granuli compresi tra 4 mm e 31,5 mm

Gli aggregati con pezzatura grossa, una volta defluita l'acqua del picnometro, vengono posizionati sopra un panno assorbente (figura 3.8) e tamponati al fine di raggiungere la condizione di superficie satura asciutta (SSA).



Figura 3.8 - Aggregati in condizioni di superficie satura asciutta

Il materiale in condizione SSA viene posto in una teglia e pesato per ottenere la massa M1 determinata per sottrazione della tara. Viene poi essiccato in forno (figura 3.9) a 40°C e il giorno successivo si individua la massa asciutta M4. La massa M3 si determina riempiendo il picnometro di acqua fino alla tacca di riferimento. La temperatura non deve variare più di 2°C da T1.



Figura 3.9 - Forno

3.2.2.2 Procedura per aggregati con granuli compresi tra 0,063 mm e 4 mm

Gli aggregati con pezzatura fine vengono versati in un setaccio da 0,063 mm in modo togliere l'acqua. Successivamente vengono posizionati in una teglia e inseriti in forno a 40°C per 30 minuti per eliminare l'acqua in eccesso. La normativa prevede che il materiale venga collocato all'interno di un cono di metallo e che venga costipato con un pestello (figura 3.10).



Figura 3.10 – Aggregati posizionati all'interno del cono

La condizione di superficie satura asciutta è quella in cui gli aggregati assumono la forma di un cono a punta come riportato nella figura 3.11.

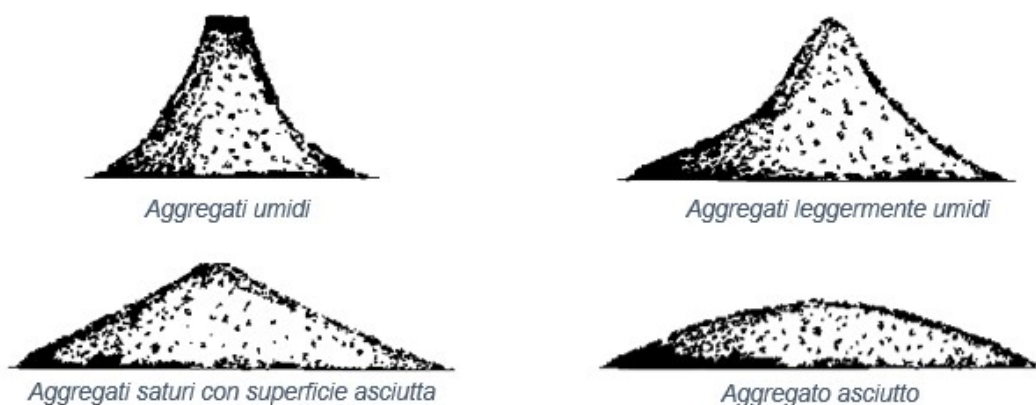


Figura 3.11 - Possibili configurazioni del materiale dopo la rimozione del cono

Il materiale viene posizionato in una teglia e pesato per individuare la massa in condizione di superficie satura asciutta M1 al netto della tara. La massa M4 si misura il giorno dopo e deriva

dal materiale riscaldato in forno a 40°C. Riempendo il picnometro con acqua, la cui temperatura non deve variare più di 2°C da T1, si ottiene la massa M3.

Successivamente si calcolano la massa volumica apparente dei granuli e l'assorbimento d'acqua degli aggregati applicando le formule sotto riportate:

- Massa volumica apparente dei granuli

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

- Assorbimento dell'acqua

$$WA_{24} = 100 * \frac{(M_1 - M_4)}{M_4}$$

La massa volumica dell'acqua ρ_w si ricava dalla tabella 3.3 in funzione della temperatura.

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m ³	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m ³
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tabella 3.3 - Massa volumica dell'acqua in funzione della temperatura

3.2.3 Preparazione dei provini

La preparazione dei provini si effettua iniziando da quella degli aggregati, che deve essere realizzata il giorno prima della miscelazione affinché l'acqua venga assorbita dagli inerti. I dosaggi in peso dei materiali sono stabiliti con il mix design (figura 3.12).



Figura 3.12 - Dosaggio del Fresato A

La tabella 3.4 di seguito riportata è un esempio di ricetta.

Materiale	Dosaggio [g]
Fresato A	7422,9
Fresato B	7105,4
Fresato C	6883,3
Filler	793
Acqua di assorbimento	398,2
Cemento	444,1
Emulsione bituminosa	888,2
Acqua di aggiunta	356,7
Totale	24291,9
Totale per ogni provino	2841,2

Tabella 3.4 – Mix design relativo alla miscela con 3,5% di filler

Gli aggregati vengono inseriti in forno a 60°C affinché risultino completamente privi di acqua. Poi, in base ai valori del mix design di progetto, si aggiungono ulteriori inerti per arrivare ai dosaggi corretti. Gli aggregati vengono successivamente posizionati all'interno di un cassone di plastica nel quale si introduce l'acqua di assorbimento. Infine, si miscelano manualmente gli inerti e si sigilla il cassone con un telo di plastica (figura 3.13).

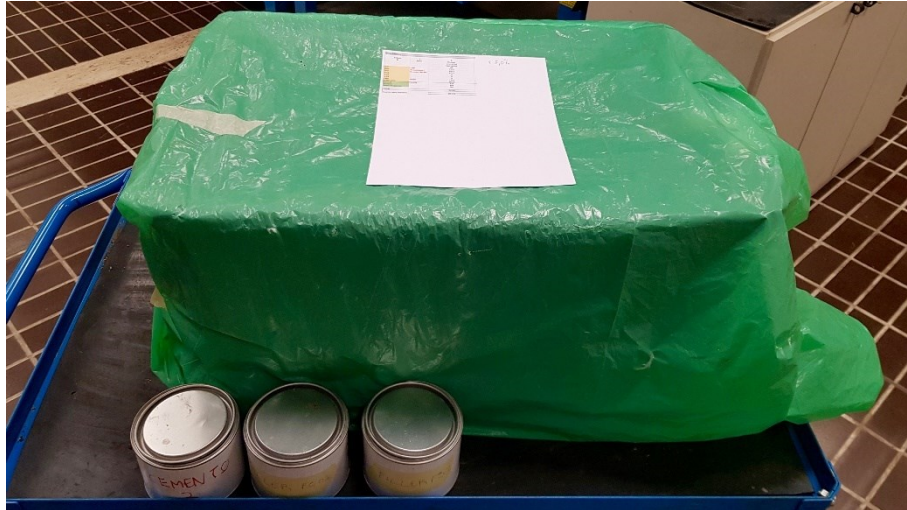


Figura 3.13 - Cassone di plastica sigillato

Il giorno successivo si procede con la miscelazione. È necessario pesare preventivamente il cemento e l'acqua di aggiunta secondo i dosaggi della ricetta. Le fasi che permettono la miscelazione dei materiali sono descritte nei passaggi che seguono.

- Si inseriscono gli aggregati nel miscelatore meccanico (figure 3.14 e 3.15).



Figura 3.14 - Miscelatore meccanico



Figura 3.15 - Aggregati nel miscelatore

- Viene aggiunto il filler (figura 3.16) e attivata la miscelazione per 1 minuto.



Figura 3.16 – Aggregati e filler nel miscelatore

- Si introduce metà del dosaggio previsto di cemento (figura 3.17) e si miscela per 1 minuto.



Figura 3.17 – Aggiunta del cemento nel miscelatore

- Viene messa la seconda metà del cemento e si miscela per 1 minuto.
- Si versa la metà del quantitativo totale di acqua di aggiunta e si aziona il miscelatore per 1 minuto. È bene prevedere una miscelazione manuale dopo quella automatica (figura 3.18).



Figura 3.18 - Aggiunta dell'acqua

- Si prende il contenitore dell'emulsione bituminosa, la quale va agitata per evitare la separazione di acqua e bitume, si pesa il dosaggio corretto e la si inserisce nel miscelatore che viene poi azionato per 1 minuto (figura 3.19).



Figura 3.19 – Aggiunta dell'emulsione bituminosa nel miscelatore

- Infine, si versa la seconda metà dell'acqua e si mescola per l'ultimo minuto. La miscelazione ha termine con quest'ultima fase (figura 3.20).



Figura 3.20 – Miscela ultimata

3.2.4 Pressa a taglio giratoria

La pressa a taglio giratoria è un'apparecchiatura impiegata per il confezionamento dei provini cilindrici in conglomerato bituminoso (figura 3.21).



Figura 3.21 – Pressa a taglio giratoria

Questa macchina permette, in ottemperanza alla normativa di riferimento UNI-EN 12697-31, di studiare l'addensamento, la lavorabilità e le caratteristiche volumetriche del conglomerato bituminoso. Essa esercita sul materiale una pressione assiale e un moto rotatorio intorno ad un asse inclinato rispetto alla verticale, conferendo un grado di addensamento che simula quello ottenuto in situ dai rulli di cantiere. Grazie alla connessione con un computer e ad un sistema di acquisizione e di controllo dei dati gestito dal software "Tecnotest" (figure 3.22, 3.23 e 3.24) è possibile valutare l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro.



Figura 3.22 - Schermata iniziale del software



Figura 3.23 - Schermata principale del software

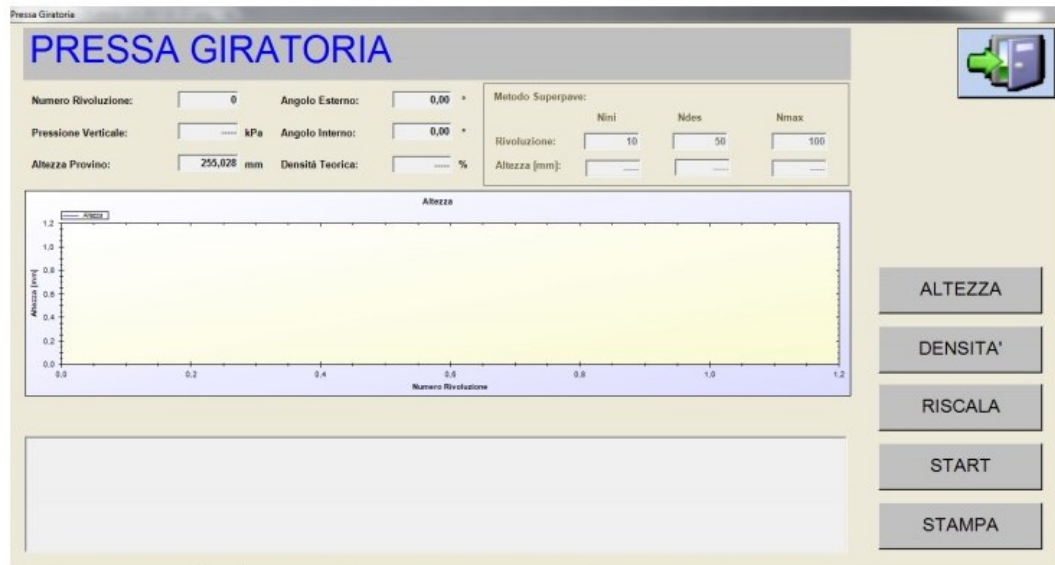


Figura 3.24 - Schermata di avvio prova del software

Vengono di seguito elencate le condizioni di prova relative alla compattazione del conglomerato bituminoso, eseguita mediante pressa giratoria, date in input al pc.

- Tipo di fustella: NON drenata
- Angolo di rotazione: 1.25°
- Velocità di rotazione: 30 giri al minuto
- Pressione verticale: 600 kPa
- Diametro provino: 150 mm (figura 3.25)
- N° giri: 100

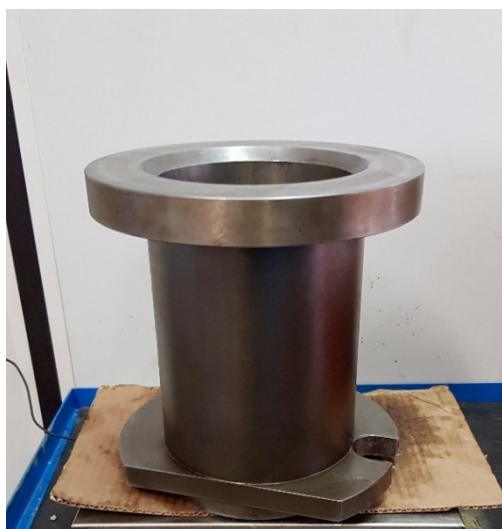


Figura 3.25 - Fustella con diametro di 150 mm

Inizialmente si posiziona un disco di carta su una piastra infinitamente rigida, che costituisce la base della fustella, per evitare l'adesione del conglomerato sulla piastra. Poi vengono introdotti i materiali (figura 3.26). Ogni provino viene realizzato con 2841,2 g di conglomerato bituminoso.



Figura 3.26 – Conglomerato bituminoso introdotto nella fustella

È necessario lubrificare il piano d'appoggio, il pistone, gli snodi e l'incasso della fustella con il grasso per contrastare eventuali attriti prima di iniziare la compattazione (figura 3.27).



Figura 3.27 – Fustella nella pressa giratoria

La fustella viene inclinata di $1,25^\circ$ per favorire l'addensamento (figura 3.28). La compattazione avviene applicando una pressione verticale e un meccanismo rotatorio a velocità costante. (figura 3.29).



Figura 3.28 – Applicazione dell'angolo di rotazione



Figura 3.29 – Prova in esecuzione

Il provino viene estratto dalla fustella, incastrata nei supporti dell'estrattore, tramite un martinetto idraulico che solleva la piastra rigida (figura 3.30).



Figura 3.30 - Estrazione del provino

Il software registra ad ogni giro l'altezza del provino e con l'evolversi della prova si costruisce la curva di compattazione. Da quest'ultima si calcola C_i , il grado di addensamento all' i -esima rotazione, in funzione di V_{m_i} , il contenuto dei vuoti relativi al numero di giri, mediante la seguente espressione:

$$C_i = 100 - V_{m_i}$$

Attraverso i dati ottenuti si individua la curva di addensamento, un grafico in cui si riportano sull'asse delle ordinate i valori del grado di addensamento in scala aritmetica e sull'asse delle ascisse il numero di giri in scala logaritmica (figura 3.31).

La relazione analitica che associa i parametri di lavorabilità è la seguente:

$$C = C_1 + k \cdot \log(N)$$

L'ordinata all'origine C_1 rappresenta l'auto-addensamento della miscela mentre la pendenza k indica la lavorabilità, cioè la capacità di compattazione e deformazione del conglomerato bituminoso sotto l'azione di una forza (tabella 3.5).

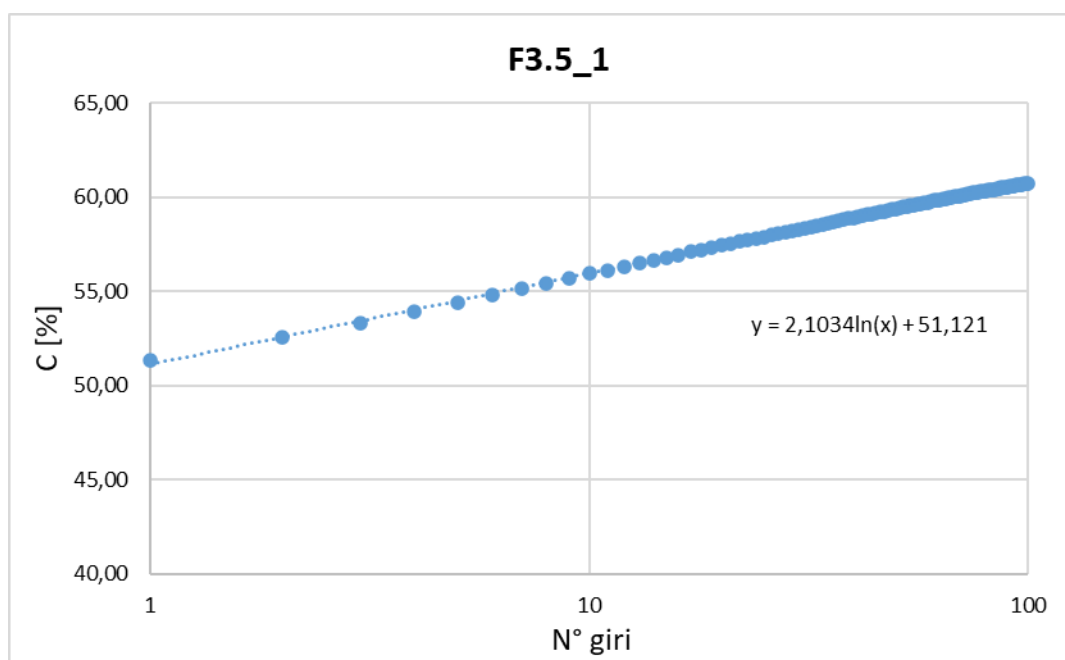


Figura 3.31 – Curva di addensamento relativa al primo provino dell'impasto con 3.5% di filler

Provino	C ₁ [%]	k [/]
1	51,121	2,1034
2	52,492	2,0997
3	51,823	2,1760
4	50,771	2,2466
5	50,637	2,2746
6	50,411	2,2515
7	50,049	2,3139
8	49,267	2,3616
Media	50,821	2,2284

Tabella 3.5 – Coefficienti C₁ e k relativi ai provini dell'impasto con 3.5% di filler

Durante la compattazione vengono annotate le masse di seguito elencate.

- Tara1: massa della fustella
- Tara2: massa del disco di carta
- Tara3: massa del vasetto
- M1: massa della fustella, della carta e del materiale pre-compattazione
- M2: massa della fustella, della carta e del materiale post-compattazione
- M4: massa del provino e del vasetto

3.2.5 Determinazione delle proprietà volumetriche

Le proprietà volumetriche della miscela influenzano il comportamento in esercizio del conglomerato bituminoso. La pressa a taglio giratoria consente di studiare queste caratteristiche attraverso l'analisi del quantitativo dei vuoti nei provini dopo la compattazione.

Il volume totale della miscela (figura 3.32) è composto da:

- aggregati;
- legante;
- vuoti.

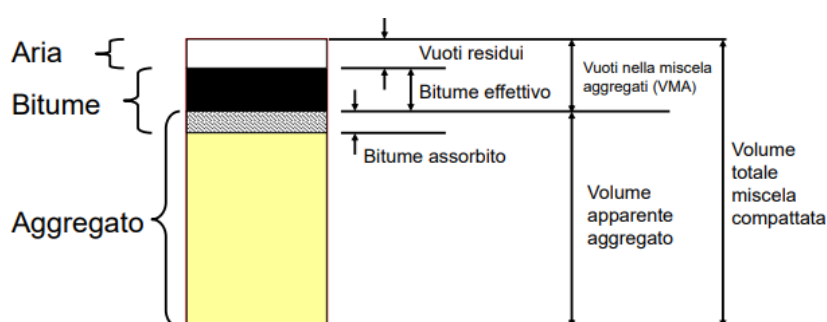


Figura 3.32 – Componenti del volume totale della miscela

Nella sperimentazione le proprietà volumetriche dei provini sono state valutate individuando la massa volumica massima, la massa volumica apparente e il volume dei vuoti.

3.2.5.1 Determinazione della massa volumica massima

La massa volumica massima è la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela di conglomerato bituminoso sfusa alla temperatura di prova. Tra i metodi proposti dalla normativa UNI EN 12697-5 nella sperimentazione è stato impiegato quello matematico. La massa volumica massima ρ_m del conglomerato bituminoso si calcola attraverso la seguente formula:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + (p_{a3}/\rho_{a3}) + (p_b/\rho_b) + (p_c/\rho_c) + (p_d/\rho_d)}$$

dove:

- ρ_m = massa volumica massima della miscela in g/cm³;
- p_{a1}, p_{a2}, p_{a3} = percentuale degli aggregati nella miscela in g/g;

- $\rho_{a1}, \rho_{a2}, \rho_{a3}$ = massa volumica apparente degli aggregati in g/cm³;
- p_b = percentuale del legante bituminoso nella miscela in g/g;
- ρ_b = massa volumica del legante bituminoso a 25 °C in g/cm³;
- p_c = percentuale del filler nella miscela in g/g;
- ρ_c = massa volumica del filler in g/cm³;
- p_d = percentuale del cemento nella miscela in g/g;
- ρ_d = massa volumica del cemento in g/cm³.

3.2.5.2 Determinazione della massa volumica apparente

La massa volumica apparente è la massa per unità di volume, compresi i vuoti d'aria, di un provino compattato alla temperatura di prova. Nella sperimentazione è stata utilizzata la procedura geometrica, descritta dalla normativa UNI EN 12697-6. La massa volumica apparente geometrica $\rho_{b,geom}$ relativa a provini cilindrici prodotti con la pressa a taglio giratoria si ricava mediante la seguente espressione:

$$\rho_{b,geom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^3$$

in cui:

- $\rho_{b,geom}$ = massa volumica apparente geometrica del provino in g/cm³;
- m_1 = massa del provino secco in g;
- h = altezza del provino in mm;
- d = diametro del provino in mm.

3.2.5.3 Determinazione del volume dei vuoti

Il volume dei vuoti dei provini compattati con la pressa a taglio giratoria, in accordo con la normativa UNI EN 12697-8, è stato definito in funzione della massa volumica apparente geometrica e della massa volumica massima con la formula di seguito riportata:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_{b,geom}}{\rho_m} \cdot 100$$

3.2.6 Prova di modulo di rigidità a trazione indiretta

Il modulo di rigidità a trazione indiretta, in accordo con la normativa UNI EN 12697-26, viene valutato mediante il NAT (Nottingham Asphalt Tester). Questa apparecchiatura, applicando una serie di sollecitazioni di compressione impulsive lungo il diametro verticale di un provino cilindrico, provoca una deformazione elastica nella direzione ortogonale rispetto a quella del carico. Il NAT (figura 3.33) simula lo stato tensionale e deformativo generato dal passaggio degli pneumatici. Il risultato della prova è l'ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus).

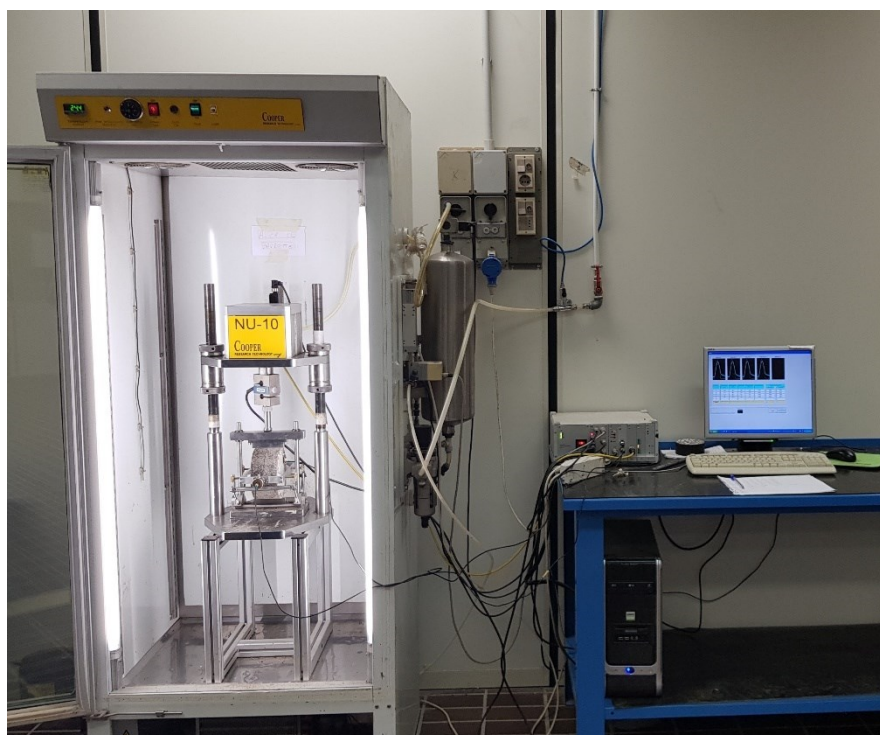


Figura 3.33 - Nottingham Asphalt Tester

Durante l'esecuzione della prova si presuppone che il materiale rimanga in campo elastico e quindi che sia omogeneo e isotropo. Il conglomerato bituminoso ha un comportamento visco-elasto-plastico ma verificandosi le condizioni di prova e nello specifico per temperature inferiori a 25°C il modulo di rigidità a trazione è uguale a quello a compressione e quindi il materiale si comporta come un mezzo elastico lineare.

L'ITSM del campione è di conseguenza funzione della geometria, del carico applicato, della deformazione orizzontale fissata, del coefficiente di Poisson, della temperatura di prova e del tempo di picco.

Il provino nel NAT è sottoposto allo stato di sollecitazione indicato nella figura 3.34.

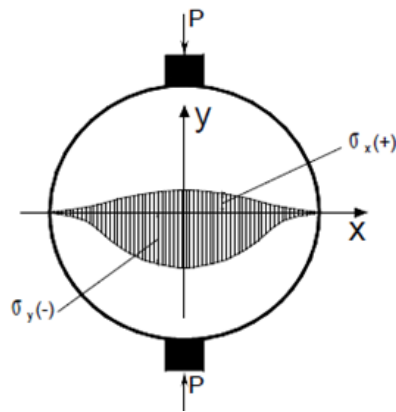


Figura 3.34 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

Le formule che permettono di calcolare le sollecitazioni medie e massime, di trazione in direzione X e di compressione in direzione Y, sono le seguenti:

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

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

dove:

- P = carico applicato;
- d = diametro del provino;
- t = spessore del provino.

Il modulo di rigidezza elastico si esprime come deformazione di un elemento sottoposto ad uno stato biassiale di tensioni. L'espressione della deformazione orizzontale media del provino $\varepsilon_{x,\text{media}}$ è:

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

in cui:

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

Dalle equazioni precedenti e tenendo presente che la deformazione orizzontale totale Δ del provino si calcola moltiplicando $\varepsilon_{x,\text{media}}$ per il diametro del provino, si ha la relazione:

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

Successivamente si ricava il modulo elastico del materiale che risulta pari a:

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

Il carico P è caratterizzato dai parametri sottoindicati (figura 3.35).

- Peak load: carico massimo applicato ad ogni ciclo
- Pulse repetition period: intervallo temporale tra due impulsi consecutivi
- Rise time: tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il carico massimo

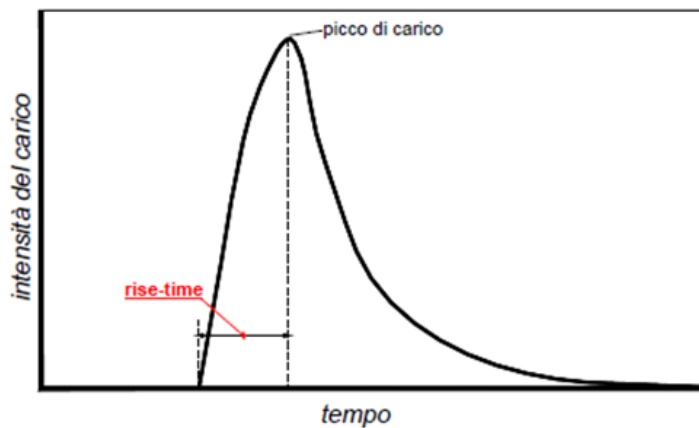


Figura 3.35 - Rappresentazione del rise-time e del peak load di un impulso di carico

Il modulo di rigidezza viene corretto tramite un fattore k che si ottiene dividendo l'area sottesa alla curva durante il rise time con il prodotto tra quest'ultimo e il peak load. Quando questo parametro non è compreso tra 0,50 e 0,70 il modulo di rigidezza assume la seguente espressione:

$$E' = E[1 - 0,322(\log(E) - 1,82)(0,60 - k)]$$

dove:

- E' = modulo di rigidezza corretto in MPa;
- k = fattore correttivo;
- E = modulo di rigidezza misurato in MPa.

Il NAT è costituito da una camera climatica per il condizionamento del campione a 20°C (figura 3.36), una cella di carico, un pistone e un dispositivo per il posizionamento del provino.



Figura 3.36 – Camera climatica a 20°C

La deformazione nella direzione ortogonale rispetto a quella di applicazione del carico si determina con dei trasduttori di spostamento, i quali sono collegati ad un computer per l'acquisizione dei dati. Il castelletto è lo strumento che consente il corretto montaggio dei trasduttori (figura 3.37).

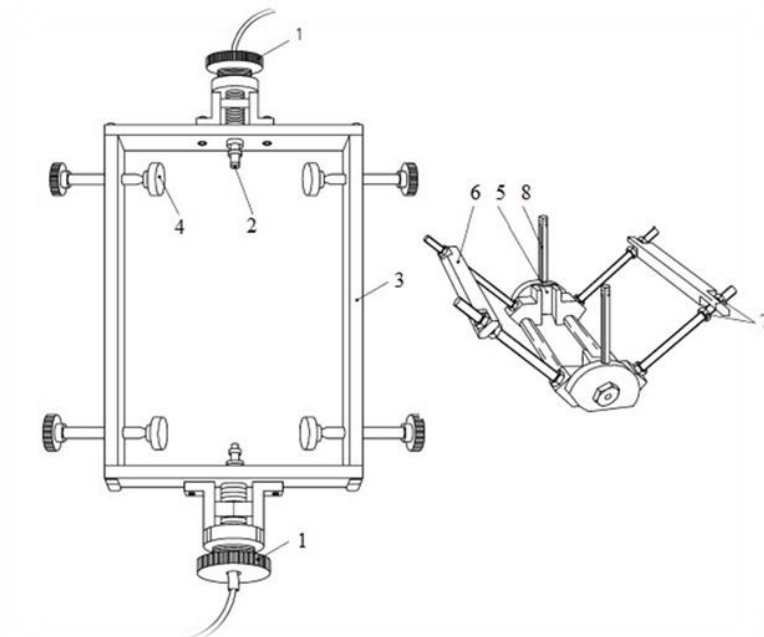


Figura 3.37 - Componenti del castelletto

Il telaio principale (3) ha la funzione di sostenere il provino, che viene centrato tramite la guida (5) e le viti (4). I trasduttori (2) vengono posizionati nei due fori, messi a contatto con il materiale e fissati con altre viti (1).

Affinché il telaio sia in bolla prima viene posto sulle barre di appoggio (6), regolate con ulteriori viti (7), poi si monta il provino sul castelletto e infine si mette una testa di carico (figura 3.38).

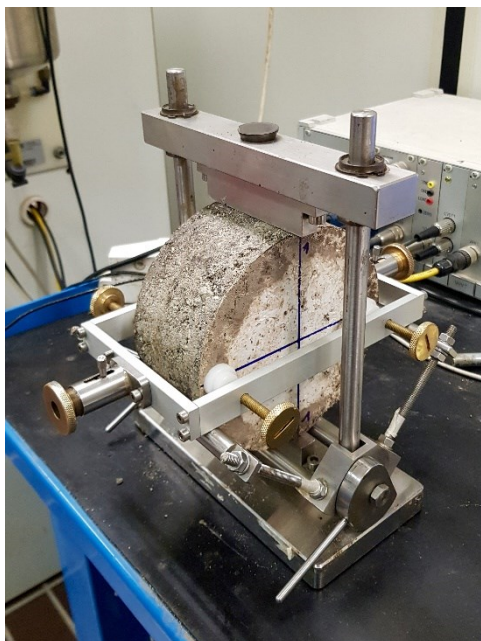


Figura 3.38 – Provino montato sul castelletto e testa di carico applicata

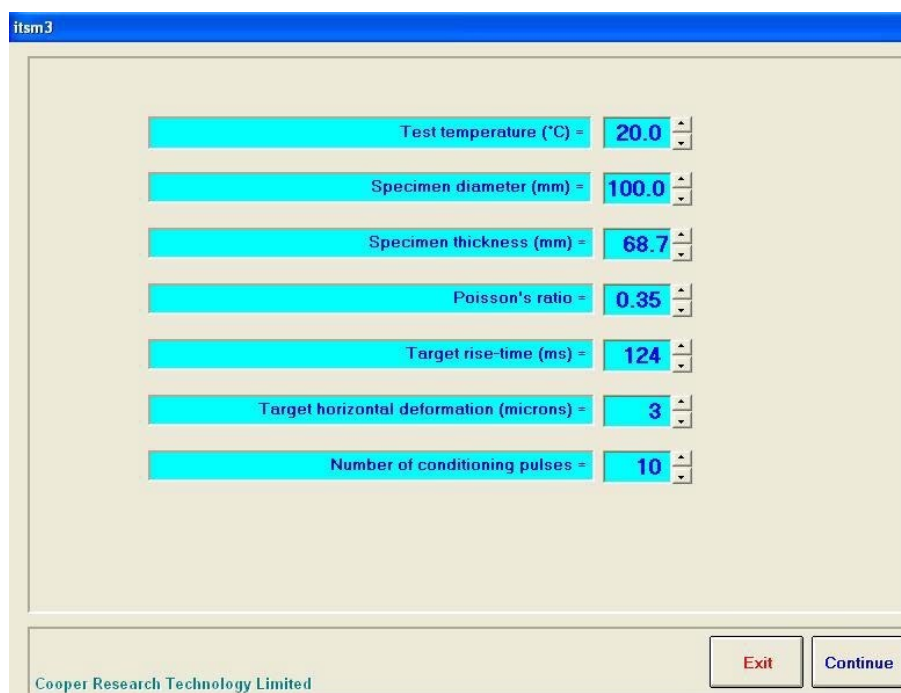
A seguire il tutto viene inserito nel NAT (figura 3.39).



Figura 3.39 - Provino posizionato nel NAT

Il NAT è dotato di un sistema di controllo e acquisizione dati e di un software per la gestione della prova. Inizialmente è necessario registrare i parametri relativi al provino di seguito elencati (figura 3.40).

- Test temperature [°C]: temperatura di prova;
- Specimen diameter [mm]: diametro del provino;
- Specimen thickness [mm]: altezza del provino;
- Poisson's ratio: coefficiente di Poisson. Se non viene misurato è assunto pari a 0,30 per i conglomerati riciclati a freddo come descritto dalla normativa;
- Target rise-time [ms]: tempo che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario per raggiungere la deformazione indicata. Nella sperimentazione il rise-time è pari a 124 ms;
- Target horizontal deformation [μm]: deformazione orizzontale che la macchina deve far raggiungere al provino. Nella sperimentazione si impone una deformazione orizzontale di 2 μm ;
- Number of conditioning pulses: numero di impulsi di precarico utili alla macchina per autocalibrarsi in modo da far raggiungere al provino la deformazione imposta. Nella sperimentazione le prove sono state eseguite con dieci colpi di condizionamento.



The screenshot shows the initial screen of the ITSM software. The window title is 'itsm3'. The interface features seven input fields, each with a cyan background and a numeric value, followed by a small up/down arrow icon. The parameters and their values are:

Parameter	Value
Test temperature (°C)	20.0
Specimen diameter (mm)	100.0
Specimen thickness (mm)	68.7
Poisson's ratio	0.35
Target rise-time (ms)	124
Target horizontal deformation (microns)	3
Number of conditioning pulses	10

At the bottom of the window, there is a footer with the text 'Cooper Research Technology Limited' on the left and two buttons, 'Exit' and 'Continue', on the right.

Figura 3.40 - Schermata iniziale del software ITSM con dati input

Successivamente si inserisce la data di prova, l'addetto che la esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. come riportato nella figura 3.41.

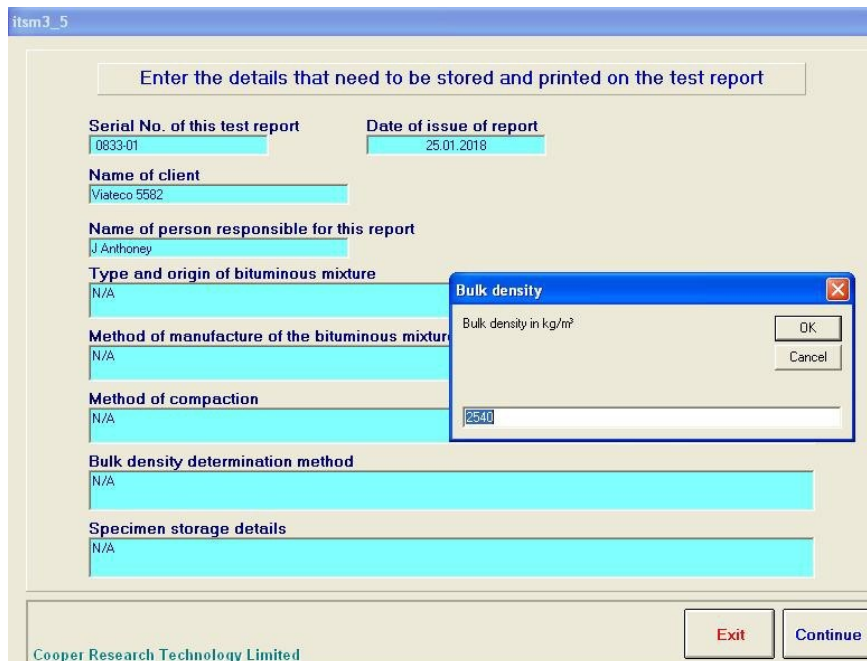


Figura 3.41 – Seconda schermata del software ITSM

Il pistone, messo a contatto con la testa di carico posta sopra il provino, produce una sollecitazione di precarico di 30 N. Questa operazione si effettua cliccando sul pulsante Make contact (figura 3.42).

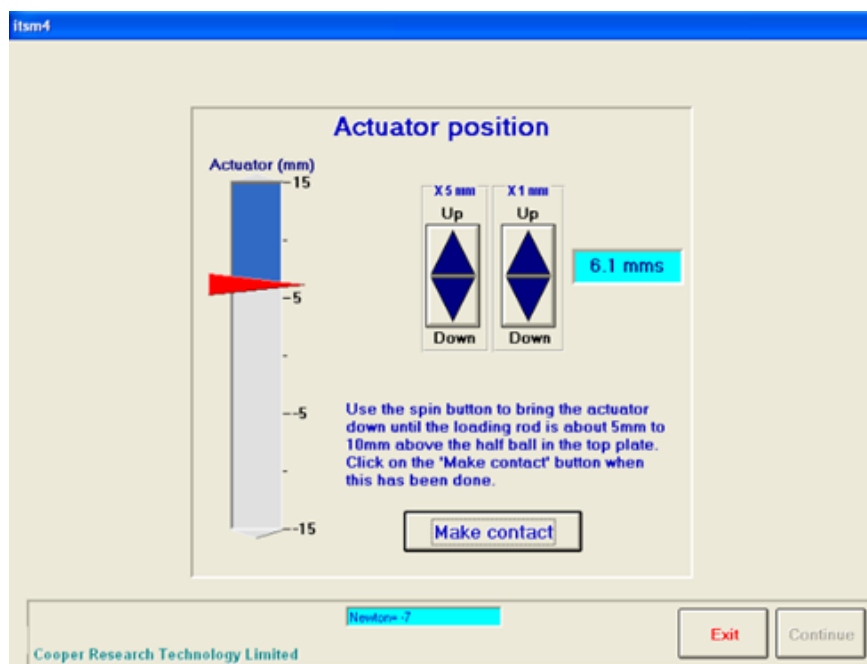


Figura 3.42 - Schermata con il comando "Make contact"

I trasduttori di spostamento devono essere regolati per una corretta misurazione della deformazione orizzontale. La giacitura esatta è rappresentata dalle frecce rosse (figure 3.43 e 3.44).

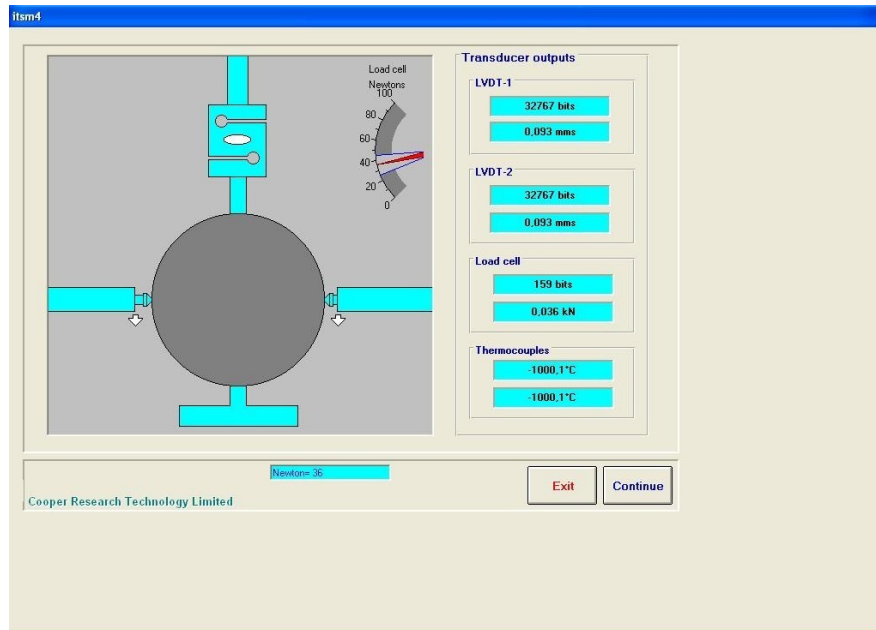


Figura 3.43 – Trasduttori non regolati

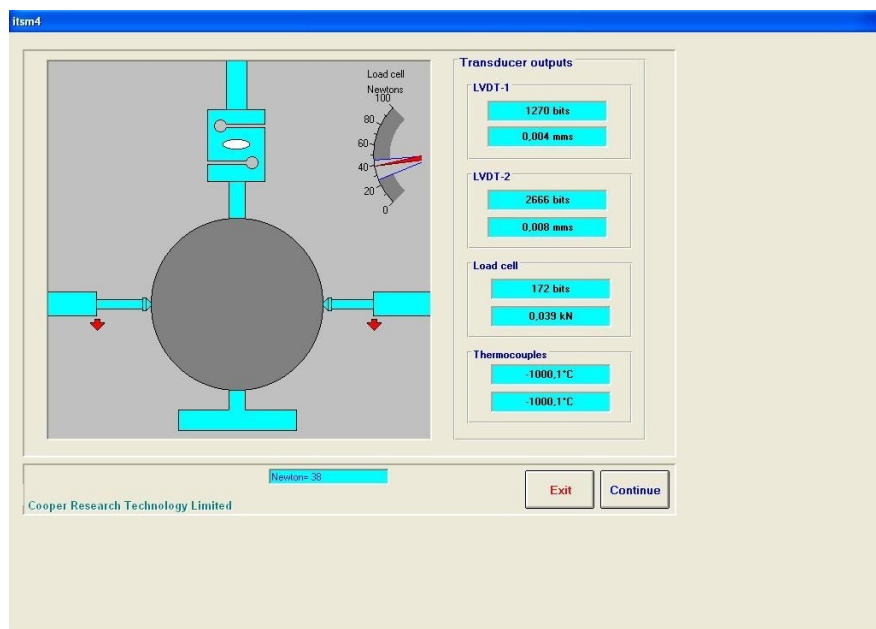


Figura 3.44 – Trasduttori regolati

Successivamente è necessario controllare la temperatura della camera climatica, la quale non deve differenziarsi rispetto a quella di prova di un valore pari a 0.5°C. I dati applicati durante i dieci impulsi di precarico sono visualizzati in un'altra schermata (figura 3.45).

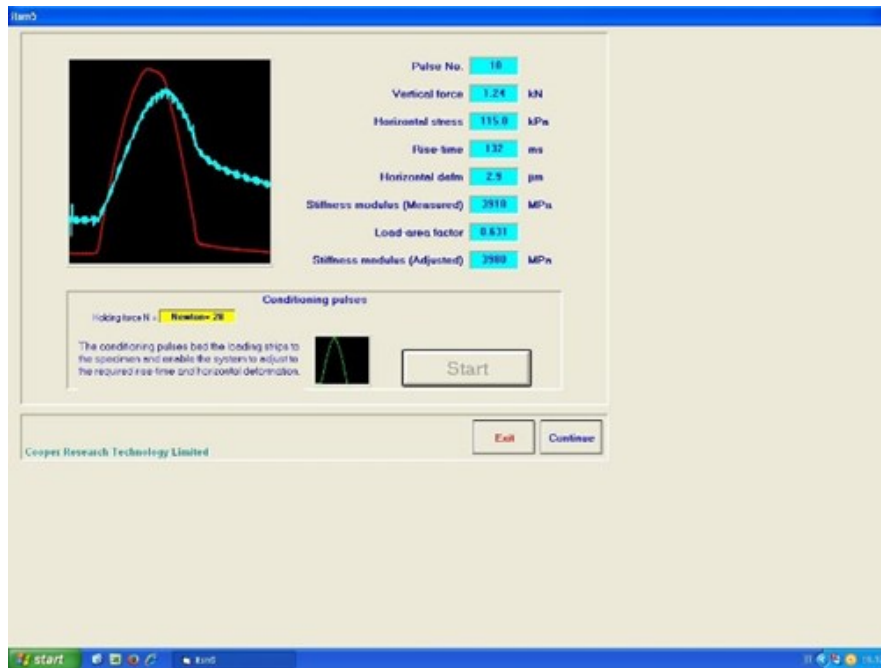


Figura 3.45 - Schermata degli impulsi precarico

Nella schermata finale vengono indicati per i cinque impulsi di prova i parametri precedentemente descritti con i rispettivi valori medi (figura 3.46).



Figura 3.46 – Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Infine, si ruota il provino di un angolo pari a $90^\circ \pm 10^\circ$ e si ripete la procedura descritta. Gli ITSM calcolati sui due diametri non devono differire più del 20%. Dalla loro media si ottiene il modulo di rigidezza a trazione indiretta definitivo.

3.2.7 Prova di rottura a trazione indiretta

La prova di trazione indiretta, chiamata anche “prova Brasiliana”, consente di determinare, come descritto dalla normativa UNI EN 12697-23, l’ITS (Indirect Tensile Strength). Questo parametro indica la massima tensione di trazione che un provino cilindrico è in grado di sopportare. L’ITS è importante per stabilire la qualità e l’acceptabilità delle miscele.

La prova di trazione indiretta si esegue ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. Nella sperimentazione i provini sono stati condizionati in camera climatica a 25°C (figura 3.47).



Figura 3.47 - Camera climatica a 25°C

L’apparecchiatura di prova è composta da un sistema di carico dato da due piatti paralleli infinitamente rigidi. Le sollecitazioni sono applicate al materiale tramite due listelli di larghezza 15 ± 2 mm, spessore 4 ± 1 mm e lunghezza maggiore della zona di contatto con il provino. Quest’ultimo è posizionato in modo che il suo asse sia orizzontale, che l’asse del listello superiore risulti parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi i listelli siano contenuti nel piano verticale passante per l’asse del provino (figura 3.48).



Figura 3.48 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

La testa di carico avanza ad una velocità costante pari a 50 ± 2 mm/min. L'apparecchiatura registra sia la deformazione di trazione e di compressione subita dal provino durante l'applicazione della sollecitazione che il carico di rottura a compressione.

La figura 3.49 mostra un provino rotto con la "prova Brasiliana".



Figura 3.49 - Provino rotto con la prova di trazione indiretta

Il software UTM II, impostando il diametro del provino, l'altezza, la velocità di avanzamento e il carico di fine prova, individua:

- la curva carico-corsa (figura 3.50);
- il carico di rottura a compressione;
- la deformazione a compressione e a trazione.

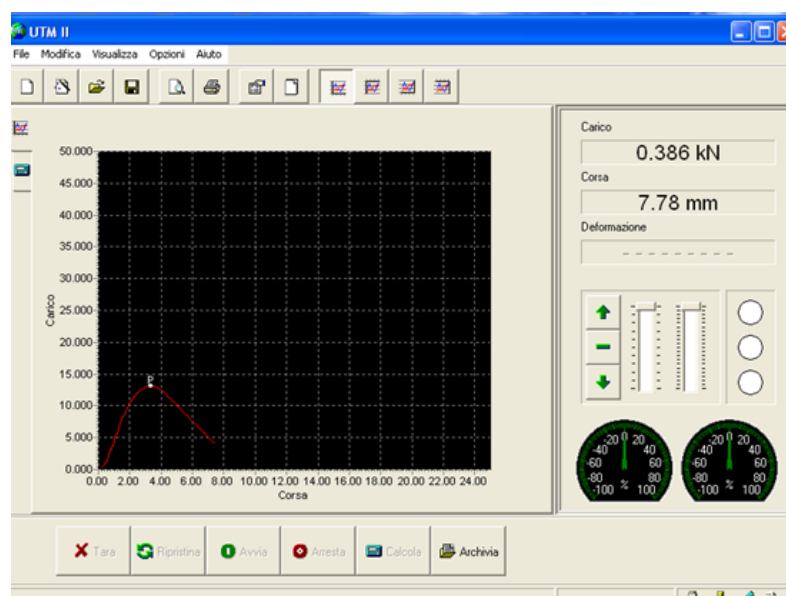


Figura 3.50 - Curva carico-corsa

Definiti i parametri sopra citati il software elabora il corrispettivo valore di resistenza a trazione indiretta ITS (figura 3.51).

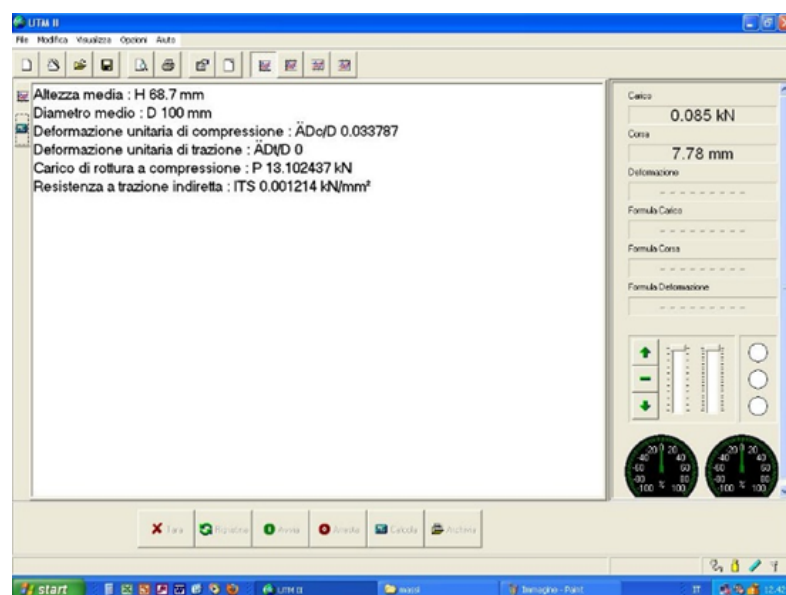


Figura 3.51 - Schermata con rielaborazione dei risultati

La resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, si calcola mediante la seguente espressione:

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

dove:

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

3.3 Elaborazione dei dati del picnometro

I parametri valutati durante l'esecuzione della prova del picnometro, descritta nel paragrafo 3.2.2, sono di seguito elencati.

- M1: massa degli aggregati in condizioni di superficie satura asciutta
- M2: massa del picnometro, degli aggregati e dell'acqua fino alla tacca di riferimento
- M3: massa del picnometro pieno d'acqua. La temperatura dell'acqua non deve differire più di 2°C da T1
- M4: massa degli aggregati asciutti dopo essiccazione in forno
- T1: temperatura dell'acqua in corrispondenza della pesata M2. La temperatura dell'acqua deve essere compresa tra 19 e 25°C
- Tara1: tara della teglia di alluminio. Per aggregati fini è data dalla somma della massa della teglia, del cono e del pistone
- ρ_w : massa volumica dell'acqua a T1

Successivamente sono riportati i risultati della prova.

- ρ_a : massa volumica apparente dei granuli
- WA_{24} : assorbimento dell'acqua

I valori definitivi di massa volumica apparente dei granuli e assorbimento d'acqua degli aggregati sono stati calcolati attraverso una media aritmetica ponderata di quelli relativi alle

due pezzature (aggregati con granuli compresi tra 4 mm e 31,5 mm e aggregati con granuli compresi tra 0,063 mm e 4 mm).

Le tabelle 3.6 presentano i parametri e i risultati derivanti dalla prova con il picnometro.

Fresato A		Fresato B		Fresato C	
M2 [g]	3641,1	M2 [g]	3630,7	M2 [g]	3764,3
M3 [g]	3249,7	M3 [g]	3249,7	M3 [g]	3249,7
M4 [g]	650,3	M4 [g]	618,7	M4 [g]	843,5
T1 [°C]	23,7	T1 [°C]	24	T1 [°C]	23
ρ_w [g/cm ³]	0,99746	ρ_w [g/cm ³]	0,9974	ρ_w [g/cm ³]	0,9976
ρ_a [g/cm ³]	2,5054	ρ_a [g/cm ³]	2,5961	ρ_a [g/cm ³]	2,5585
WA ₂₄ (%)	1,5	WA ₂₄ (%)	2,1	WA ₂₄ (%)	2

T1	23,7	T1	24	T1	23
Tinf	23	Tinf	24	Tinf	23
$\rho_{w,inf}$ [g/cm ³]	997,6	$\rho_{w,inf}$ [g/cm ³]	997,4	$\rho_{w,inf}$ [g/cm ³]	997,6
Tsup	24	Tsup	24	Tsup	23
$\rho_{w,sup}$ [g/cm ³]	997,4	$\rho_{w,sup}$ [g/cm ³]	997,4	$\rho_{w,sup}$ [g/cm ³]	997,4
ρ_w [g/cm ³]	997,46	ρ_w [g/cm ³]	997,4	ρ_w [g/cm ³]	997,6

Tabelle 3.6 - Elaborazione dai dati del picnometro relativi ai Fresati A, B e C

3.4 Miscele di progetto degli aggregati

Le curve granulometriche di progetto, relative alle cinque miscele preparate con differente percentuale di filler calcareo, sono state determinate in modo tale da avvicinarsi alla media del fuso del Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano illustrato nel paragrafo 1.4.5.

Sono state valutate cinque diverse miscele denominate:

- MIX 1
- MIX 2
- MIX 3
- MIX 4
- MIX 5

3.4.1 MIX 1

La miscela MIX 1 è composta da:

- fresato A in quantità pari al 34,7% in peso della miscela;
- fresato B in quantità pari al 33,2% in peso della miscela;
- fresato C in quantità pari al 32,1% in peso della miscela;
- filler calcareo pari a 0.

	Fresato A	Fresato B	Fresato C	Filler calcareo	MIX 1
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100
16	97,8	97,4	0	100	66,2
10	87,1	89,9	0	100	60
8	79	82,7	0	100	54,8
4	54,4	59,5	0	100	38,6
2	34,1	41,4	0	100	25,6
1	19,6	28,8	0	100	16,4
0,5	10,7	21	0	100	10,7
0,25	6	17,1	0	98,6	7,7
0,125	2,9	12,2	0	90,2	5
0,063	1,8	8,4	0	77,6	3,4
Fondo	0	0	0	0	0

Tabella 3.7 – Granulometrie relative alle componenti della miscela MIX 1

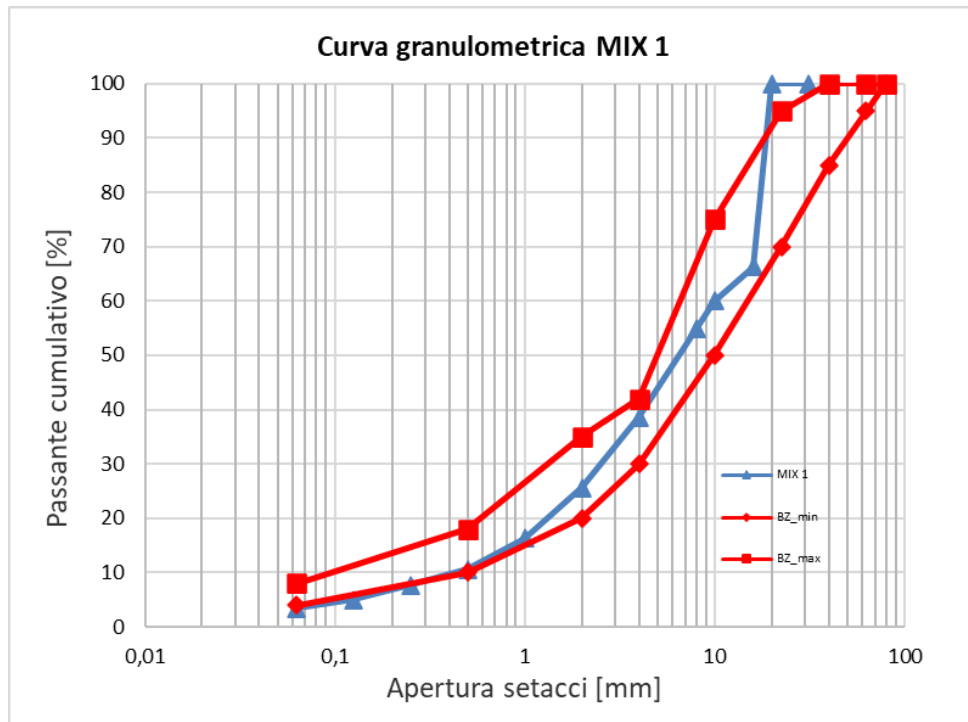


Figura 3.52 - Curva granulometrica MIX 1

3.4.2 MIX 2

La miscela MIX 2 è composta da:

- fresato A in quantità pari al 34% in peso della miscela;
- fresato B in quantità pari al 32,5% in peso della miscela;
- fresato C in quantità pari al 31,5% in peso della miscela;
- filler calcareo in quantità pari al 2% in peso della miscela.

	Fresato A	Fresato B	Fresato C	Filler calcareo	MIX 2
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100
16	97,8	97,4	0	100	66,9
10	87,1	89,9	0	100	60,9
8	79	82,7	0	100	55,7
4	54,4	59,5	0	100	39,8
2	34,1	41,4	0	100	27,1
1	19,6	28,8	0	100	18,1
0,5	10,7	21	0	100	12,5
0,25	6	17,1	0	98,6	9,6
0,125	2,9	12,2	0	90,2	6,8
0,063	1,8	8,4	0	77,6	4,9
Fondo	0	0	0	0	0

Tabella 3.8 – Granulometrie relative alle componenti della miscela MIX 2

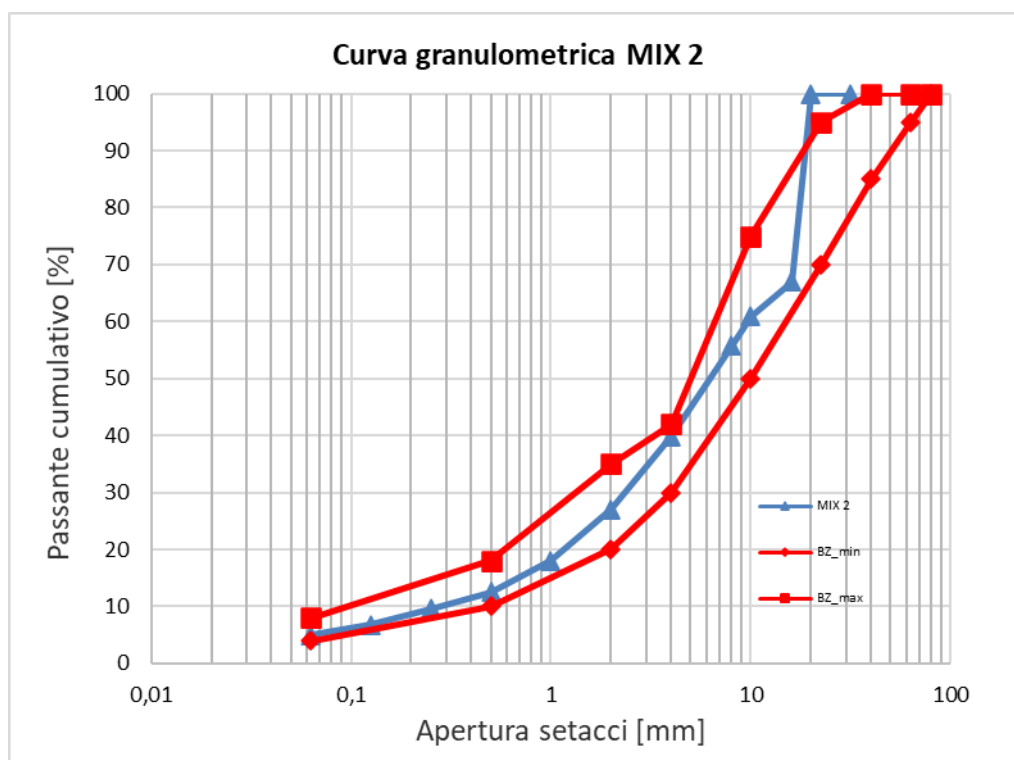


Figura 3.53 - Curva granulometrica MIX 2

3.4.3 MIX 3

La miscela MIX 3 è composta da:

- fresato A in quantità pari al 33,5% in peso della miscela;
- fresato B in quantità pari al 32% in peso della miscela;
- fresato C in quantità pari al 31% in peso della miscela;
- filler calcareo in quantità pari al 3,5% in peso della miscela.

	Fresato A	Fresato B	Fresato C	Filler calcareo	MIX 3
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100
16	97,8	97,4	0	100	67,4
10	87,1	89,9	0	100	61,4
8	79	82,7	0	100	56,4
4	54,4	59,5	0	100	40,7
2	34,1	41,4	0	100	28,2
1	19,6	28,8	0	100	19,3
0,5	10,7	21	0	100	13,8
0,25	6	17,1	0	98,6	10,9
0,125	2,9	12,2	0	90,2	8
0,063	1,8	8,4	0	77,6	6
Fondo	0	0	0	0	0

Tabella 3.9 – Granulometrie relative alle componenti della miscela MIX 3

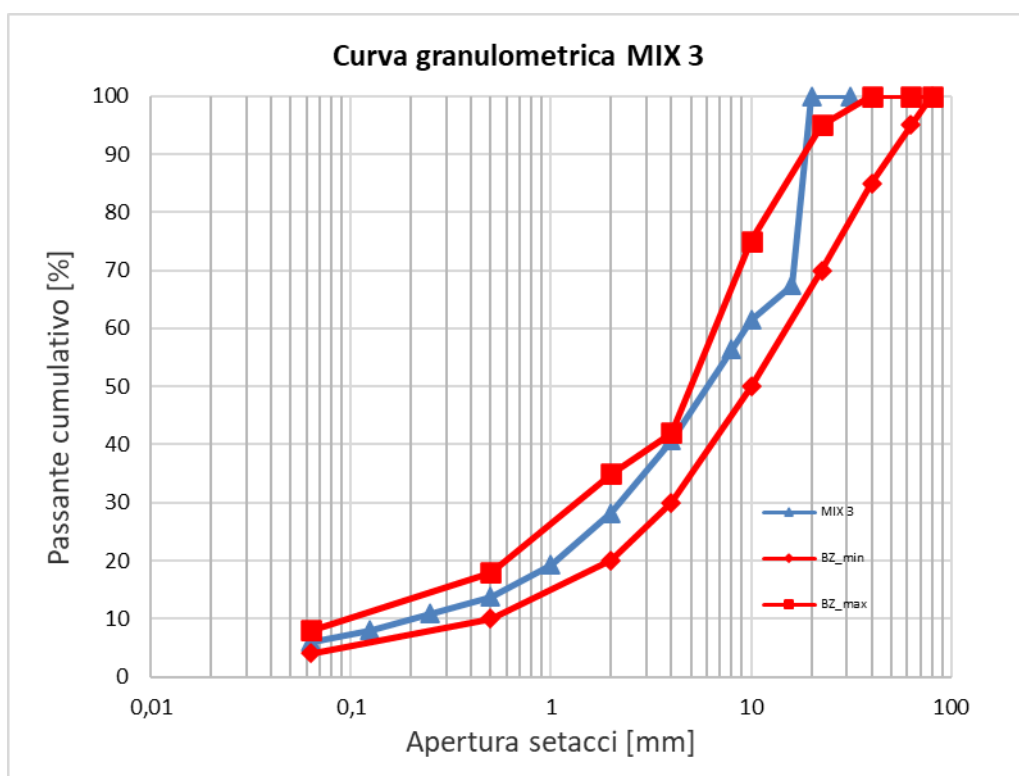


Figura 3.54 - Curva granulometrica MIX 3

3.4.4 MIX 4

La miscela MIX 4 è composta da:

- fresato A in quantità pari al 33% in peso della miscela;
- fresato B in quantità pari al 31,5% in peso della miscela;
- fresato C in quantità pari al 30,5% in peso della miscela;
- filler calcareo in quantità pari al 5% in peso della miscela.

	Fresato A	Fresato B	Fresato C	Filler calcareo	MIX 4
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	100,0	100,0	100,0	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100	100,0
16	97,8	97,4	0,0	100	67,9
10	87,1	89,9	0,0	100	62,0
8	79,0	82,7	0,0	100	57,1
4	54,4	59,5	0,0	100	41,6
2	34,1	41,4	0,0	100	29,2
1	19,6	28,8	0,0	100	20,5
0,5	10,7	21,0	0,0	100	15,1
0,25	6,0	17,1	0,0	98,6	12,2
0,125	2,9	12,2	0,0	90,2	9,2
0,063	1,8	8,4	0,0	77,6	7,1
Fondo	0,0	0	0	0	0

Tabella 3.10 – Granulometrie relative alle componenti della miscela MIX 4

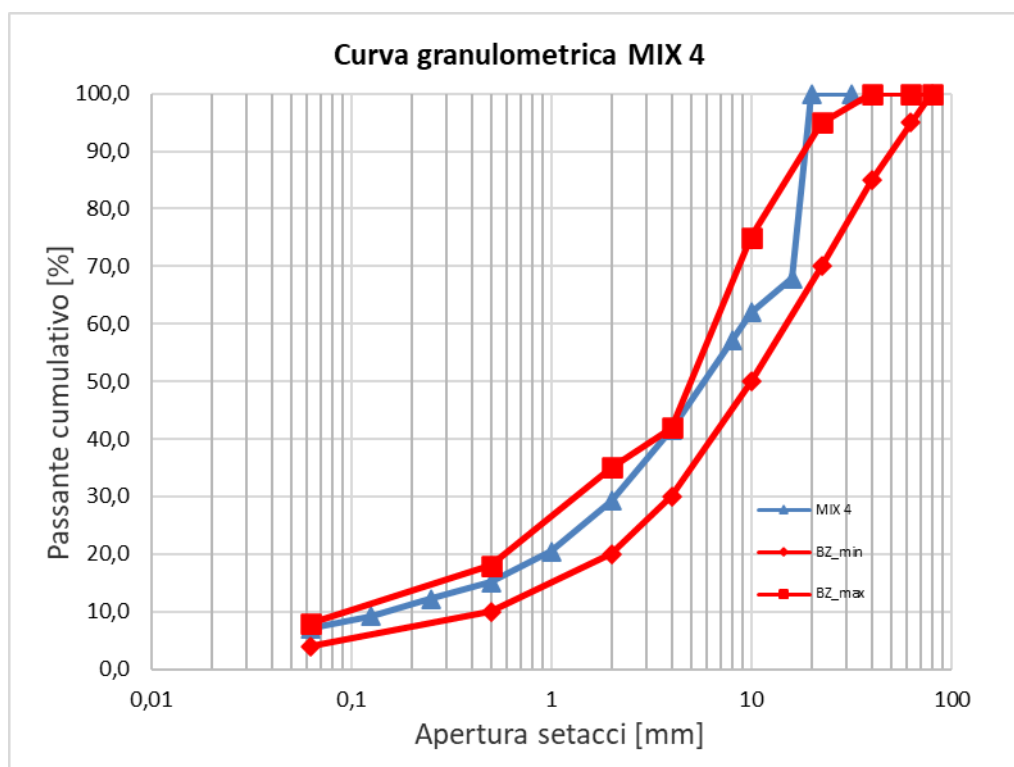


Figura 3.55 - Curva granulometrica MIX 4

3.4.5 MIX 5

La miscela MIX 5 è composta da:

- fresato A in quantità pari al 32,5% in peso della miscela;
- fresato B in quantità pari al 31% in peso della miscela;
- fresato C in quantità pari al 30% in peso della miscela;
- filler calcareo in quantità pari al 6,5% in peso della miscela.

	Fresato A	Fresato B	Fresato C	Filler calcareo	MIX 5
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	100,0	100,0	100,0	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100	100,0
16	97,8	97,4	0,0	100	68,4
10	87,1	89,9	0,0	100	62,6
8	79,0	82,7	0,0	100	57,7
4	54,4	59,5	0,0	100	42,5
2	34,1	41,4	0,0	100	30,3
1	19,6	28,8	0,0	100	21,6
0,5	10,7	21,0	0,0	100	16,3
0,25	6,0	17,1	0,0	98,6	13,5
0,125	2,9	12,2	0,0	90,2	10,4
0,063	1,8	8,4	0,0	77,6	8,1
Fondo	0,0	0	0	0	0

Tabella 3.11 – Granulometrie relative alle componenti della miscela MIX 5

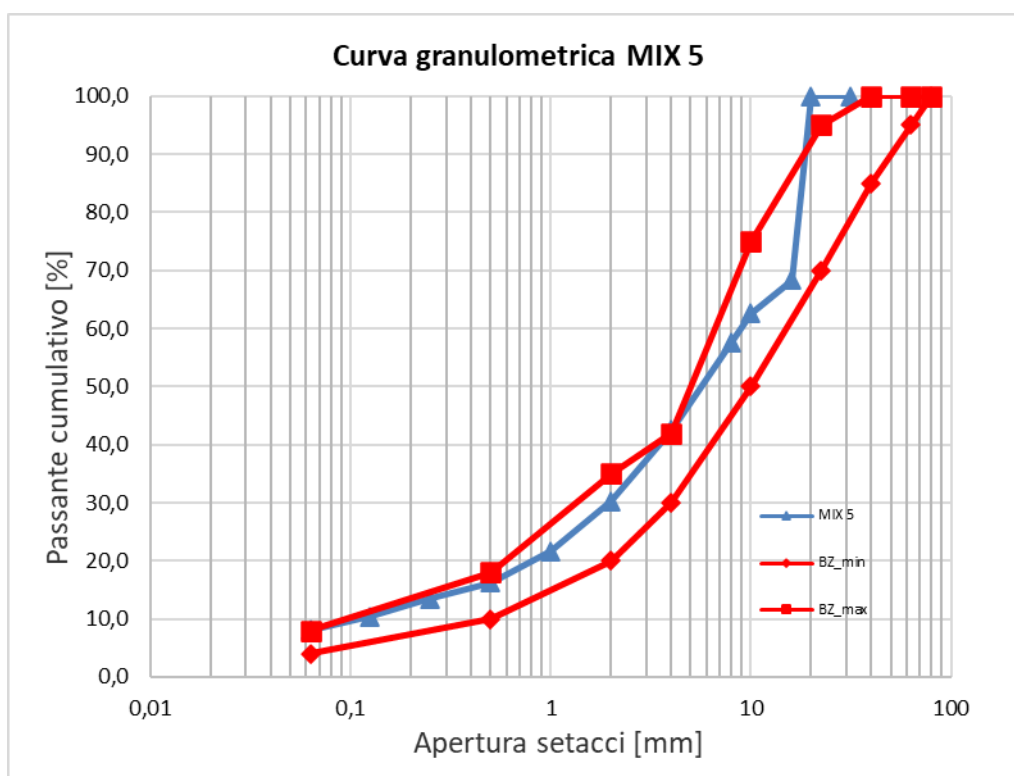


Figura 3.56 - Curva granulometrica MIX 5

3.5 Miscele di progetto

Nelle cinque miscele realizzate variando principalmente il dosaggio del filler calcareo sono mantenuti costanti i quantitativi di:

- emulsione bituminosa pari al 4% in peso della miscela;
- cemento Portland pari al 2% in peso della miscela;
- acqua pari al 5% in peso della miscela.

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di caratterizzare e confrontare a livello prestazionale le miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo al variare del contenuto di filler calcareo.

3.5.1 Codifica provini

Ad ogni miscela corrisponde un impasto che, in funzione della percentuale di filler calcareo impiegato, è stato codificato come segue:

- F0 (senza il filler) per il MIX 1;

- F2.0 (2% di filler) per il MIX 2;
- F3.5 (3.5% di filler) per il MIX 3;
- F5.0 (5% di filler) per il MIX 4;
- F6.5 (6.5% di filler) per il MIX 5.

Ogni impasto ha determinato il confezionamento, tramite pressa a taglio giratoria, di otto provini con diametro di 150 mm e altezza post-compattazione pari a circa 72 mm (figura 3.57).



Figura 3.57 - Provini

I singoli provini sono stati identificati secondo lo schema in esempio sotto riportato.

Provino F3.5_3

dove:

- la lettera F è seguita dalla percentuale di filler calcareo presente nell'impasto;
- il numero successivo corrisponde all'ordine di confezionamento del provino.

Capitolo 4 - Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dalla sperimentazione. Durante l'attività di ricerca sono state realizzate cinque miscele, contraddistinte principalmente per la percentuale di filler introdotto. Con ogni miscela sono stati confezionati otto provini per un totale di quaranta unità. Le prove a cui sono stati sottoposti sono di seguito elencate:

- curve di compattazione e parametri di lavorabilità;
- perdita di acqua dopo la compattazione e nei successivi tre, sette e quattordici giorni;
- proprietà volumetriche;
- prove di modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM) tre giorni dopo la compattazione;
- prove di rottura a trazione indiretta (ITS) tre giorni dopo la compattazione.

4.1 Curve di compattazione e parametri di lavorabilità

Le curve di compattazione, grafici in cui si riportano sull'asse delle ordinate i valori dell'altezza del provino in scala aritmetica e sull'asse delle ascisse il numero di giri in scala logaritmica, sono state ricavate dai dati ottenuti durante la compattazione del conglomerato bituminoso con la pressa a taglio giratoria. Successivamente sono stati determinati i parametri di lavorabilità C_1 e k , descritti nel paragrafo 3.2.4.

Le sezioni che seguono illustrano attraverso grafici e tabelle i risultati elaborati per ogni tipologia di impasto esaminato. In particolare vengono riportate le curve di compattazione e i parametri di lavorabilità.

4.1.1 Impasto F0

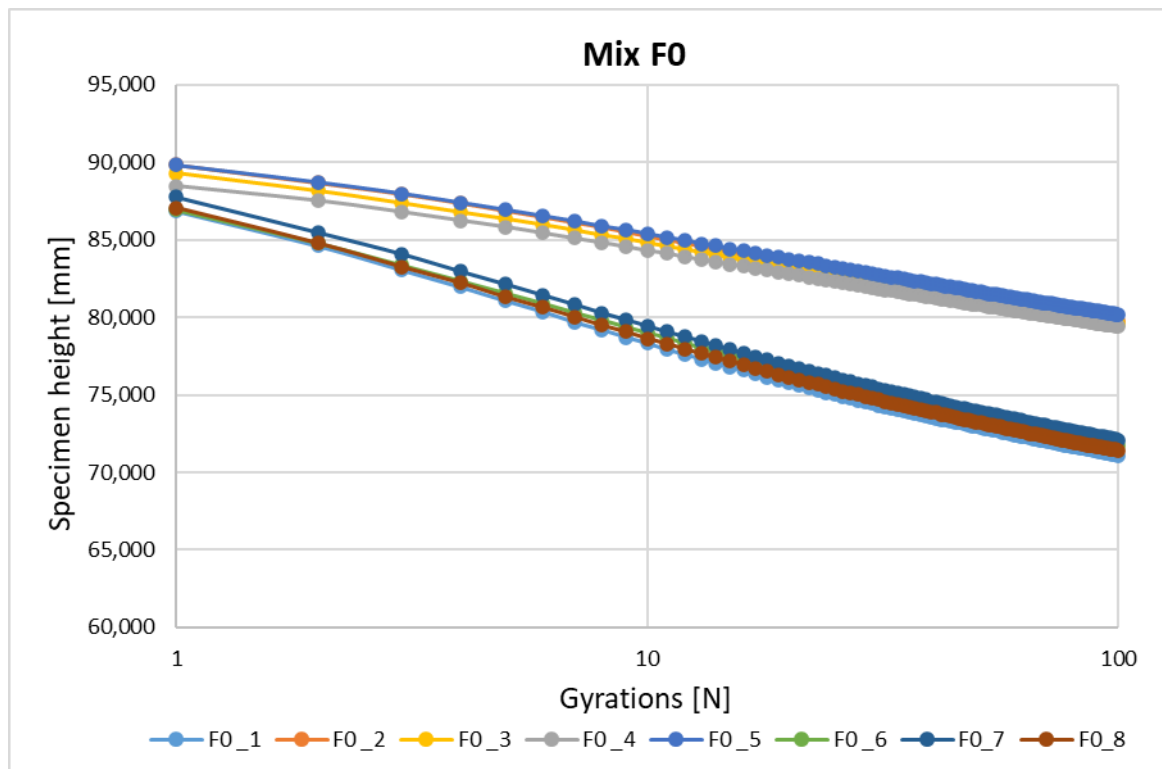


Figura 4.1 - Curve di compattazione relative ai provini dell'impasto F0

Provino	C ₁ [%]	k [/]
1	50,051	2,4808
2	47,953	1,4514
3	48,277	1,4126
4	48,763	1,3314
5	48,018	1,3804
6	49,763	2,4092
7	49,395	2,4403
8	49,862	2,4653
Media	49,768	2,4489

Tabella 4.1 – Parametri di lavorabilità relativi ai provini dell'impasto F0

I valori evidenziati in rosso nella tabella 4.1 sono stati scartati perché relativi a provini che hanno subito un'errata compattazione con la pressa a taglio giratoria.

4.1.2 Impasto F2.0

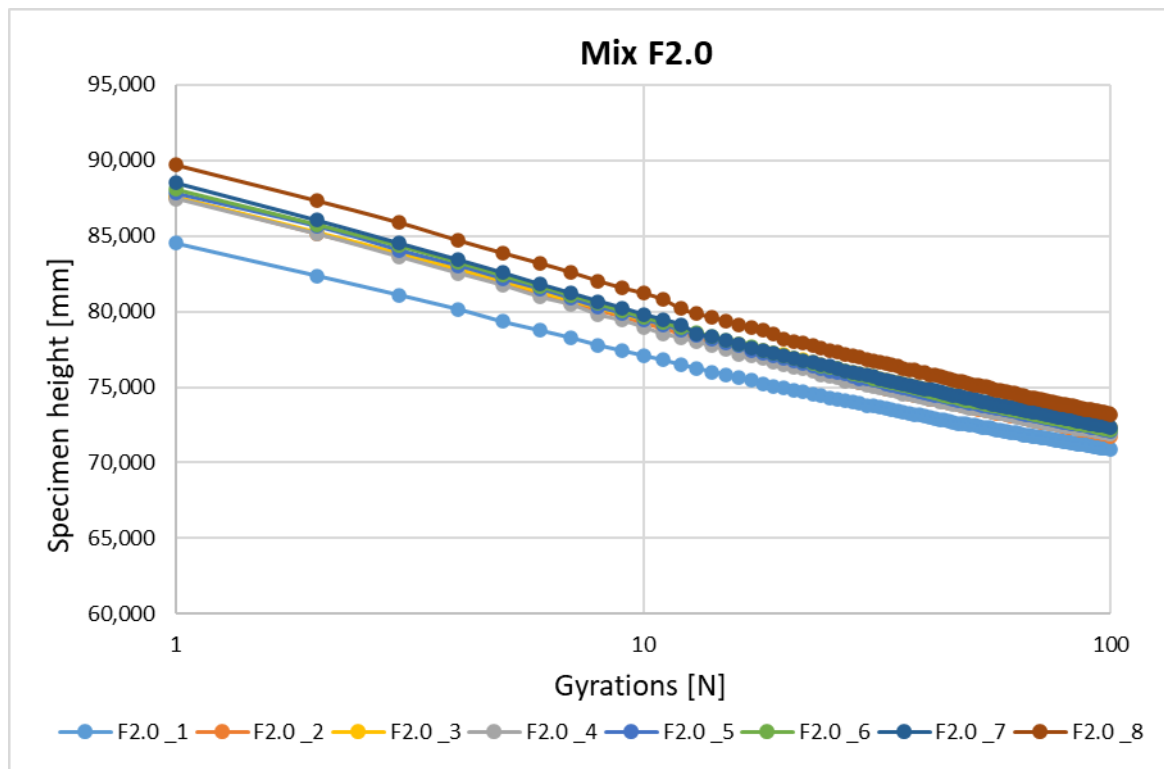


Figura 4.2 - Curve di compattazione relative ai provini dell'impasto F2.0

Provino	C ₁ [%]	k [°]
1	51,837	2,1844
2	49,741	2,4671
3	49,729	2,3726
4	49,991	2,4061
5	49,579	2,4495
6	49,394	2,4733
7	49,354	2,4569
8	48,415	2,4999
Media	49,755	2,4137

Tabella 4.2 – Parametri di lavorabilità relativi ai provini dell'impasto F2.0

4.1.3 Impasto F3.5

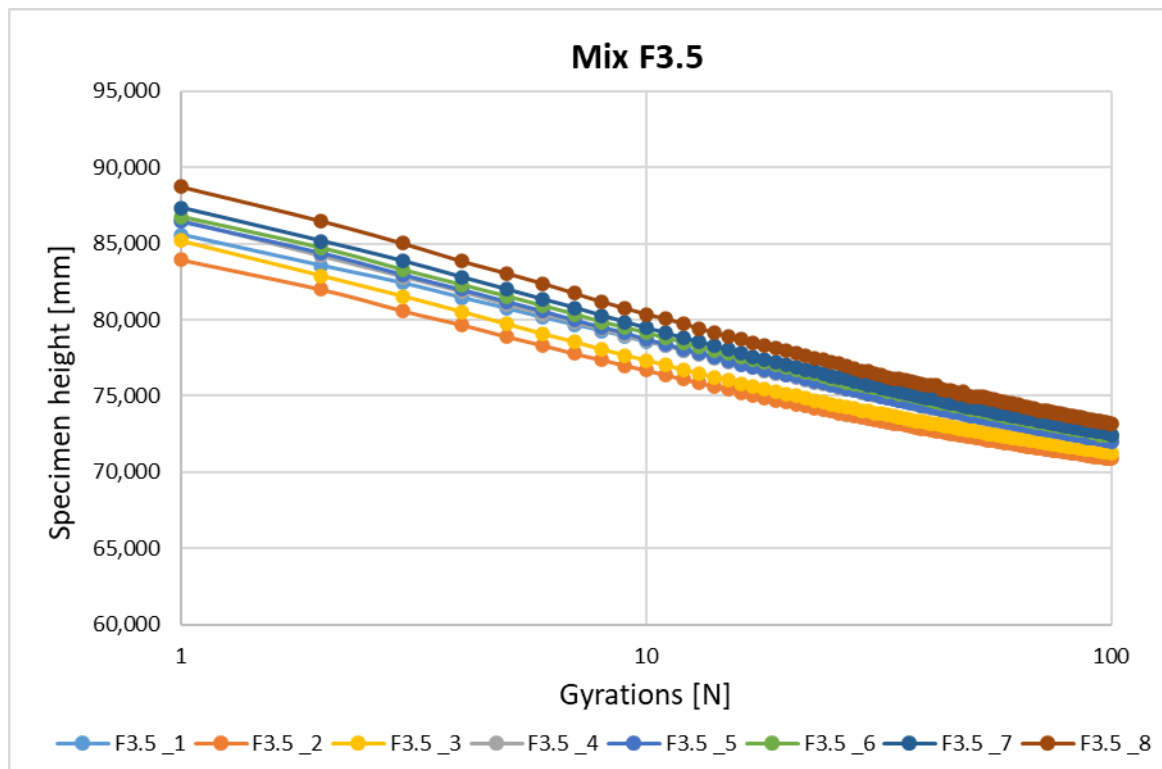


Figura 4.3 - Curve di compattazione relative ai provini dell'impasto F3.5

Provino	C_1 [%]	k [\backslash]
1	51,121	2,1034
2	52,492	2,0997
3	51,823	2,1760
4	50,771	2,2466
5	50,637	2,2746
6	50,411	2,2515
7	50,049	2,3139
8	49,267	2,3616
Media	50,821	2,2284

Tabella 4.3 – Parametri di lavorabilità relativi ai provini dell'impasto F3.5

4.1.4 Impasto F5.0

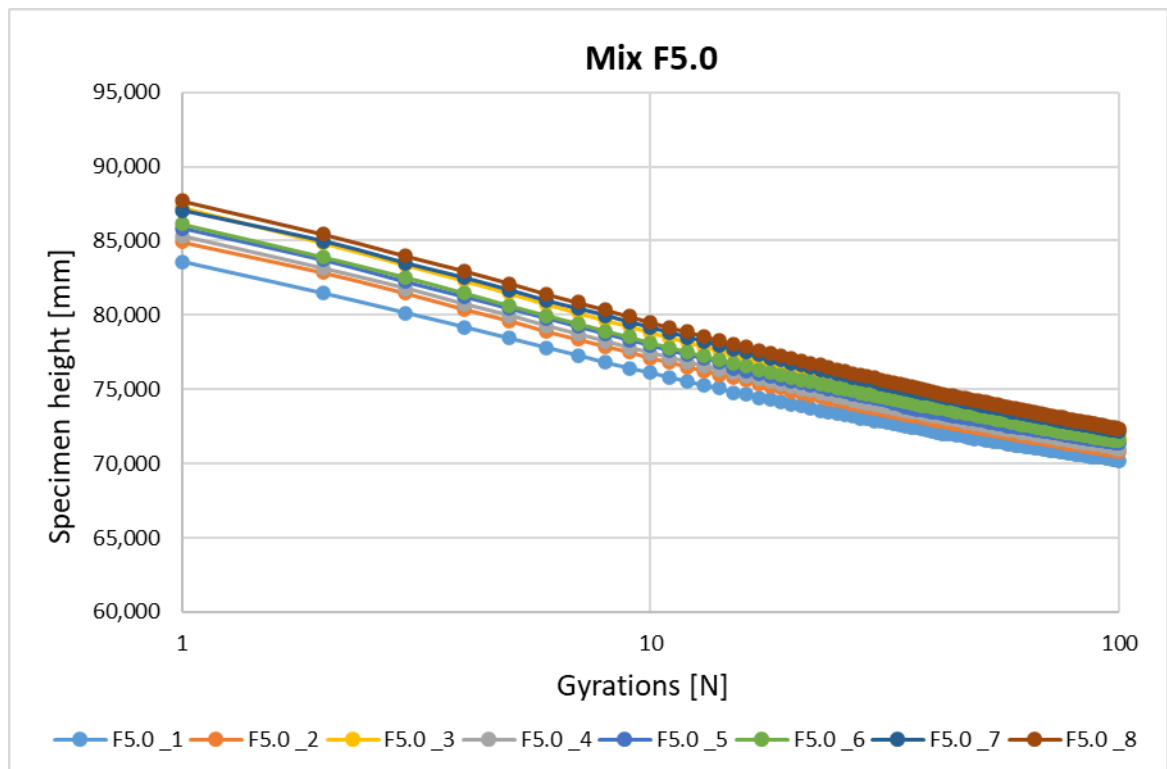


Figura 4.4 - Curve di compattazione relative ai provini dell'impasto F5.0

Provino	C_1 [%]	k [\backslash]
1	52,935	2,1776
2	51,955	2,2712
3	50,447	2,4019
4	51,696	2,2841
5	51,315	2,3128
6	51,148	2,3087
7	50,375	2,3446
8	50,002	2,3957
Media	51,234	2,3121

Tabella 4.4 – Parametri di lavorabilità relativi ai provini dell'impasto F5.0

4.1.5 Impasto F6.5

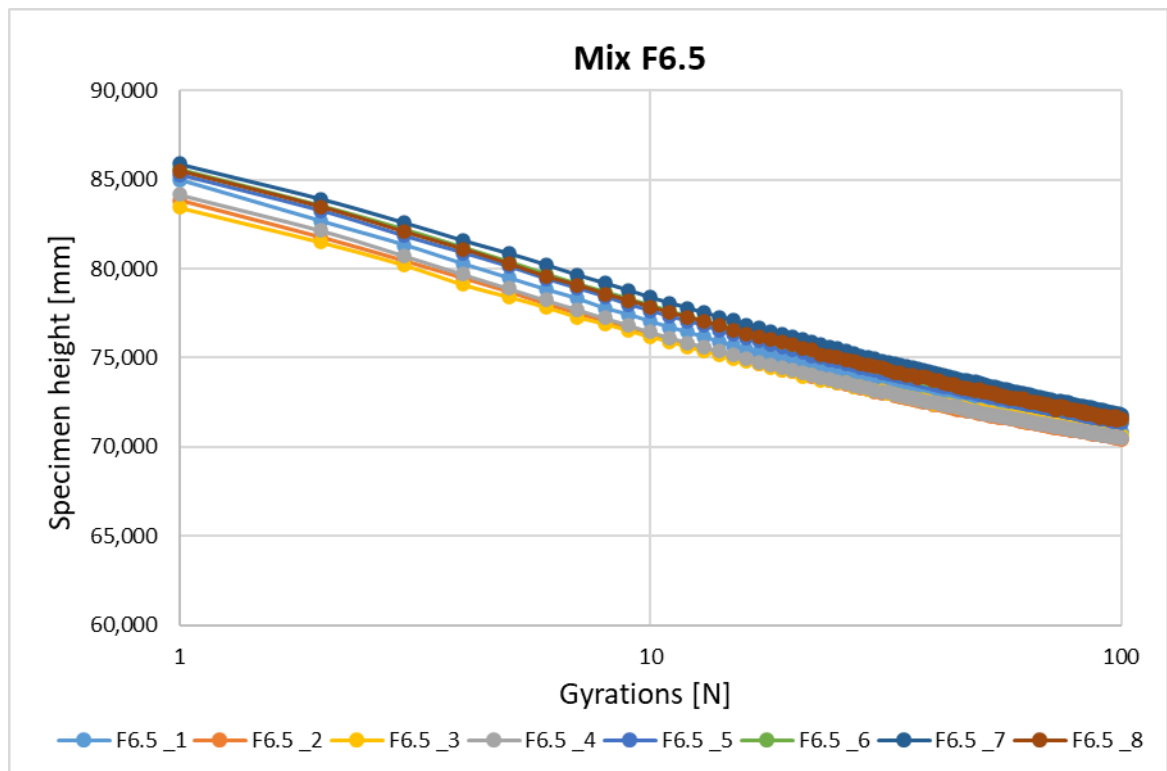


Figura 4.5 - Curve di compattazione relative ai provini dell'impasto F6.5

Provino	C ₁ [%]	k [°]
1	52,257	2,2568
2	52,960	2,1744
3	53,285	2,0656
4	52,758	2,2128
5	51,868	2,2265
6	51,593	2,2472
7	51,261	2,2636
8	51,685	2,2355
Media	52,208	2,2103

Tabella 4.5 – Parametri di lavorabilità relativi ai provini dell'impasto F6.5

4.1.6 Confronto

Dai risultati ottenuti emerge chiaramente che all'aumentare della percentuale di filler introdotto nella miscela corrisponde ovviamente la crescita del valore dell'auto-

addensamento (C_1), passando per il valore medio da 49,768% per l'impasto F0 a 52,208% per quello F6.5, e contestualmente si verifica un abbassamento dei valori della lavorabilità (k).

4.2 Perdita di acqua

I prossimi grafici illustrano, per ogni impasto, la perdita di acqua dei provini dopo la compattazione e nei successivi tre, sette e quattordici giorni.

4.2.1 Impasto F0

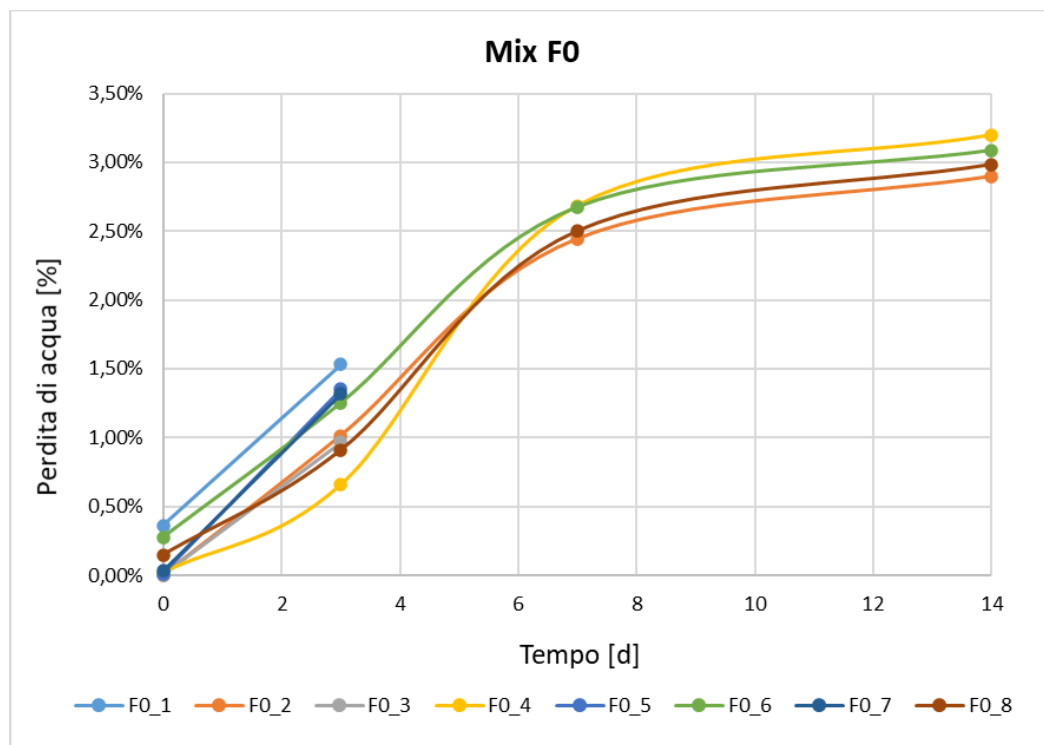


Figura 4.6 - Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto F0

4.2.2 Impasto F2.0

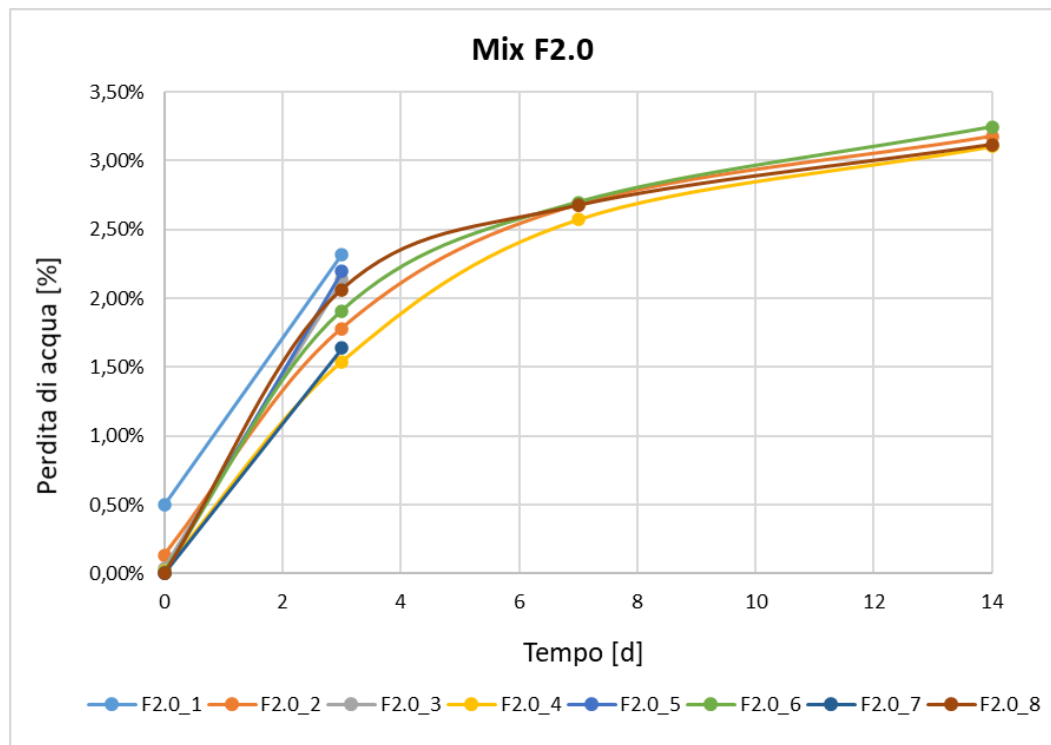


Figura 4.7 - Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto F2.0

4.2.3 Impasto F3.5

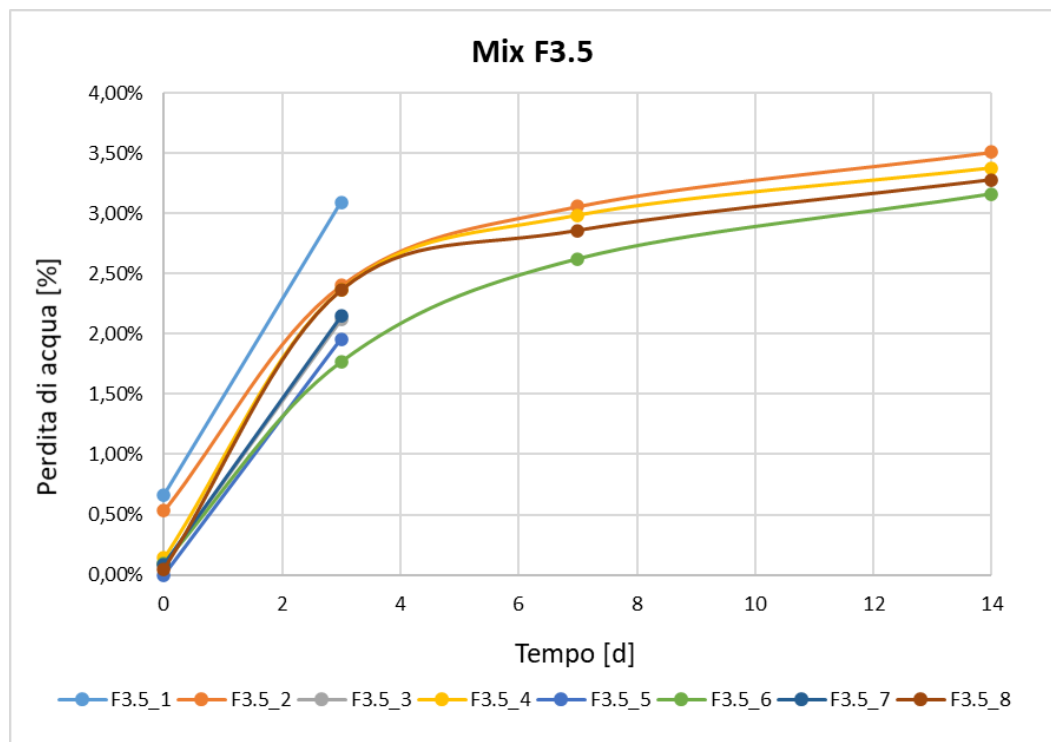


Figura 4.8 - Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto F3.5

4.2.4 Impasto F5.0

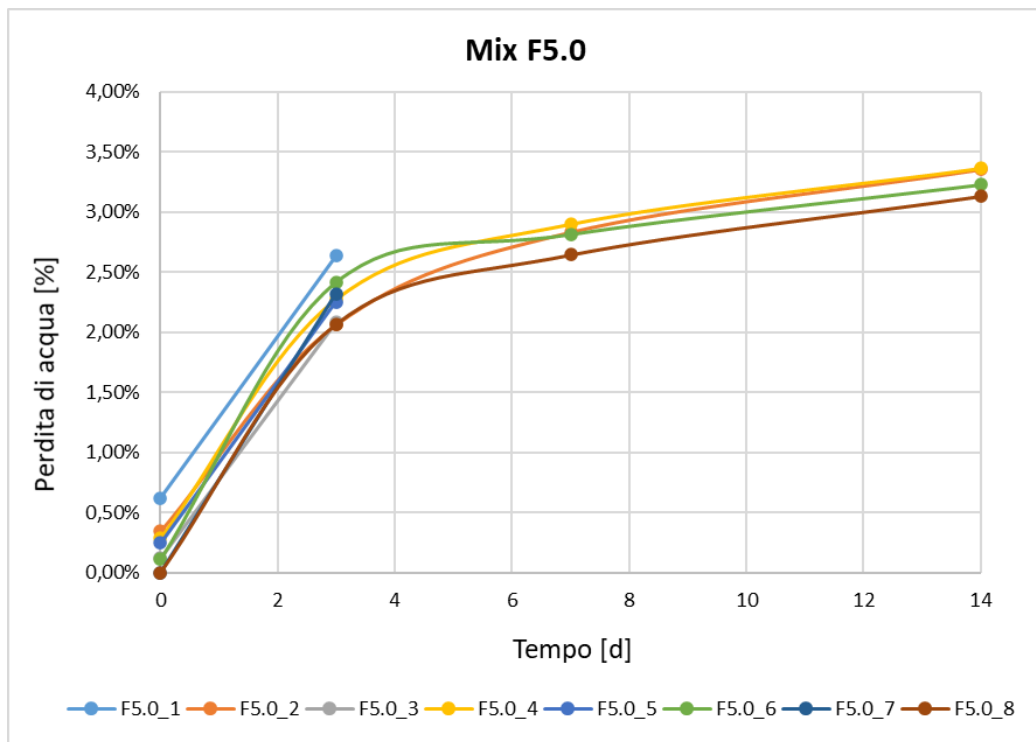


Figura 4.9 - Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto F5.0

4.2.5 Impasto F6.5

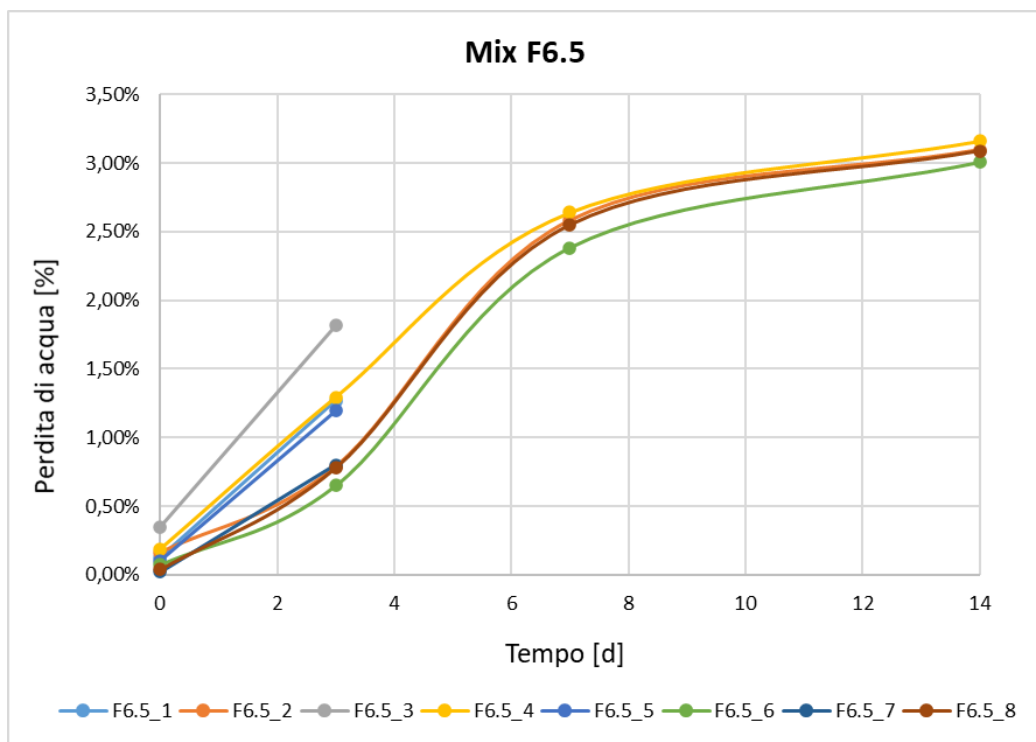


Figura 4.10 - Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto F6.5

4.3 Proprietà volumetriche

Le proprietà volumetriche determinate su tutti i provini esaminati e i parametri ottenuti vengono riportati nelle tabelle che seguono.

4.3.1 Impasto F0

$\rho_{\text{Fresato A}}$	33,18
$\rho_{\text{Fresato B}}$	31,72
$\rho_{\text{Fresato C}}$	30,75
$\rho_{\text{Filler calcareo}}$	0
ρ_{Cemento}	1,95
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}}$	2,40
$\rho_{\text{Fresato A}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,54
$\rho_{\text{Fresato B}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,49
$\rho_{\text{Fresato C}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,59
$\rho_{\text{Filler calcareo}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,80
$\rho_{\text{Cemento}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	3,02
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	1,02
$\rho_m [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,4569

Tabella 4.6 – Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto F0

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	V _m [%]
F0_1	71,5	150	2722,2	2,1537	12,3
F0_2	79,4	150	2722,9	1,9412	21
F0_3	79,3	150	2731,9	1,9495	20,7
F0_4	79	150	2714,7	1,9446	20,9
F0_5	79,6	150	2730,7	1,9407	21
F0_6	72	150	2714,4	2,1349	13,1
F0_7	72,5	150	2731,3	2,1326	13,2
F0_8	71,6	150	2719,1	2,1482	12,6
				Media	12,8

Tabella 4.7 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto F0

I valori evidenziati in rosso nella tabella 4.7 sono stati scartati perché relativi a provini che hanno subito un'errata compattazione con la pressa a taglio giratoria.

4.3.2 Impasto F2.0

$\rho_{\text{Fresato A}}$	32,52
$\rho_{\text{Fresato B}}$	31,08
$\rho_{\text{Fresato C}}$	30,10
$\rho_{\text{Filler calcareo}}$	1,95
ρ_{Cemento}	1,95
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}}$	2,40
$\rho_{\text{Fresato A}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,54
$\rho_{\text{Fresato B}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,49
$\rho_{\text{Fresato C}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,59
$\rho_{\text{Filler calcareo}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,80
$\rho_{\text{Cemento}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	3,02
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	1,02
$\rho_m [\text{g}/\text{cm}^3]$	2,4613

Tabella 4.8 – Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto F2.0

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	V _m [%]
F2.0_1	71,2	150	2709	2,1523	12,6
F2.0_2	72,2	150	2719,9	2,1332	13,3
F2.0_3	72,5	150	2720,3	2,1247	13,7
F2.0_4	72,2	150	2721,7	2,1346	13,3
F2.0_5	72,3	150	2725,8	2,1349	13,3
F2.0_6	72,4	150	2722,5	2,1286	13,5
F2.0_7	72,4	150	2725,4	2,1295	13,5
F2.0_8	73,4	150	2729,1	2,1047	14,5
				Media	13,4

Tabella 4.9 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto F2.0

4.3.3 Impasto F3.5

$\rho_{\text{Fresato A}}$	31,97
$\rho_{\text{Fresato B}}$	30,61
$\rho_{\text{Fresato C}}$	29,65
$\rho_{\text{Filler calcareo}}$	3,42
ρ_{Cemento}	1,95
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}}$	2,40
$\rho_{\text{Fresato A [g/cm}^3\text{]}}$	2,54
$\rho_{\text{Fresato B [g/cm}^3\text{]}}$	2,49
$\rho_{\text{Fresato C [g/cm}^3\text{]}}$	2,59
$\rho_{\text{Filler calcareo [g/cm}^3\text{]}}$	2,80
$\rho_{\text{Cemento [g/cm}^3\text{]}}$	3,02
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa [g/cm}^3\text{]}}$	1,02
$\rho_m \text{ [g/cm}^3\text{]}$	2,4646

Tabella 4.10 – Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto F3.5

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	V _m [%]
F3.5_1	72,9	150	2704,4	2,1007	14,8
F3.5_2	72	150	2708,1	2,1284	13,6
F3.5_3	72,2	150	2715,1	2,1288	13,6
F3.5_4	73	150	2711,4	2,1025	14,7
F3.5_5	72,8	150	2722,8	2,1172	14,1
F3.5_6	73,3	150	2720,9	2,1013	14,7
F3.5_7	73,2	150	2710,7	2,0949	15
F3.5_8	73,8	150	2719,9	2,0863	15,3
				Media	14,5

Tabella 4.11 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto F3.5

4.3.4 Impasto F5.0

$\rho_{\text{Fresato A}}$	31,52
$\rho_{\text{Fresato B}}$	30,08
$\rho_{\text{Fresato C}}$	29,17
$\rho_{\text{Filler calcareo}}$	4,88
ρ_{Cemento}	1,95
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}}$	2,40
$\rho_{\text{Fresato A [g/cm}^3\text{]}}$	2,54
$\rho_{\text{Fresato B [g/cm}^3\text{]}}$	2,49
$\rho_{\text{Fresato C [g/cm}^3\text{]}}$	2,59
$\rho_{\text{Filler calcareo [g/cm}^3\text{]}}$	2,80
$\rho_{\text{Cemento [g/cm}^3\text{]}}$	3,02
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa [g/cm}^3\text{]}}$	1,02
$\rho_m \text{ [g/cm}^3\text{]}$	2,4679

Tabella 4.12 – Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto F5.0

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m_1 [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	V_m [%]
F5.0_1	70,5	150	2708,9	2,1744	11,9
F5.0_2	71,5	150	2710,9	2,1448	13,1
F5.0_3	72,1	150	2716,5	2,1328	13,6
F5.0_4	71,3	150	2719,1	2,1588	12,5
F5.0_5	71,5	150	2715,4	2,1483	12,9
F5.0_6	71,8	150	2717,4	2,1432	13,2
F5.0_7	72,3	150	2727,8	2,1350	13,5
F5.0_8	72,2	150	2727,7	2,1387	13,3
				Media	13

Tabella 4.13 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto F5.0

4.3.5 Impasto F6.5

$\rho_{\text{Fresato A}}$	30,94
$\rho_{\text{Fresato B}}$	29,67
$\rho_{\text{Fresato C}}$	28,70
$\rho_{\text{Filler calcareo}}$	6,34
ρ_{Cemento}	1,95
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa}}$	2,40
$\rho_{\text{Fresato A [g/cm}^3\text{]}}$	2,54
$\rho_{\text{Fresato B [g/cm}^3\text{]}}$	2,49
$\rho_{\text{Fresato C [g/cm}^3\text{]}}$	2,59
$\rho_{\text{Filler calcareo [g/cm}^3\text{]}}$	2,80
$\rho_{\text{Cemento [g/cm}^3\text{]}}$	3,02
$\rho_{\text{Emulsione bituminosa [g/cm}^3\text{]}}$	1,02
$\rho_m \text{ [g/cm}^3\text{]}$	2,4711

Tabella 4.14 – Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto F6.5

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	V _m [%]
F6.5_1	71,6	150	2726,7	2,1558	12,8
F6.5_2	71,3	150	2719,1	2,1596	12,6
F6.5_3	71,5	150	2717,5	2,1508	13
F6.5_4	71,2	150	2707,5	2,1511	12,9
F6.5_5	72,2	150	2732,2	2,1414	13,3
F6.5_6	72,4	150	2720,1	2,1275	13,9
F6.5_7	72,5	150	2737,0	2,1356	13,6
F6.5_8	72,3	150	2714,6	2,1261	14
				Media	13,3

Tabella 4.15 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto F6.5

4.3.6 Confronto

La Figura 4.11 evidenzia il variare del volume dei vuoti in funzione della percentuale di filler calcareo presente nell'impasto. Dall'analisi dei risultati ottenuti non sono visibili rilevanti differenze tra le tre miscele studiate, se non quelle esclusivamente dipendenti dalla ripetibilità della prova.

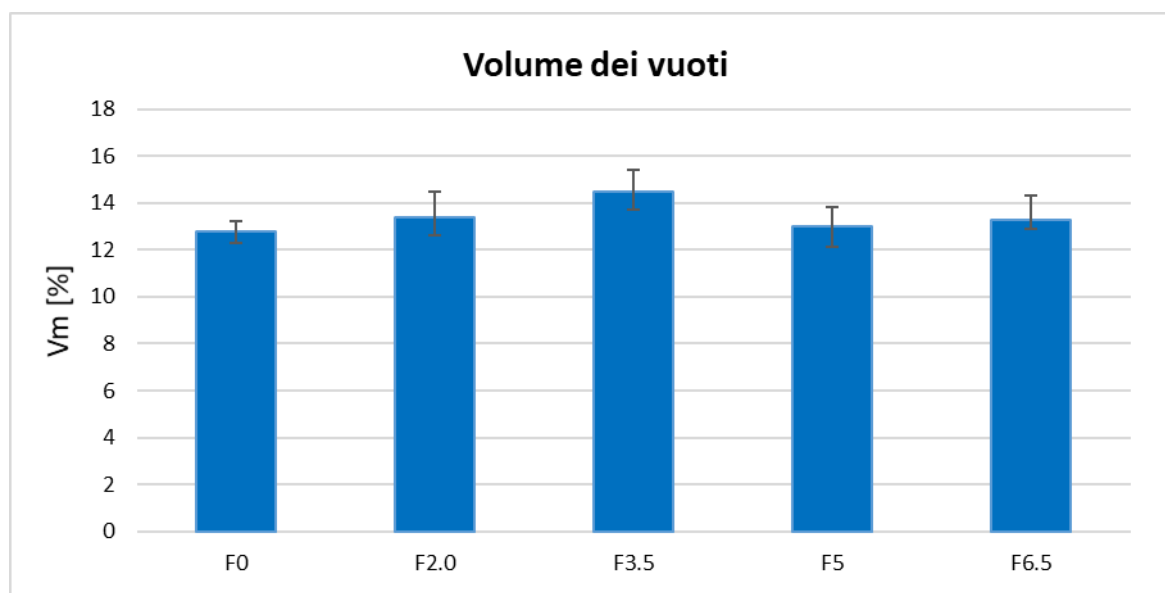


Figura 4.11 - Riepilogo e confronto del volume dei vuoti di ogni impasto

4.4 Prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta

I risultati della prova di modulo di rigidezza a trazione indiretta, descritta nel paragrafo 3.2.6, eseguita tre giorni dopo la compattazione dei provini, sono riportati nelle tabelle che seguono. La prova, effettuata su due diagonali del provino ortogonali tra di loro al fine di ottenere il valore medio $ITSM_m$, riguarda i seguenti provini:

- F0_1, F0_3, F0_5 e F0_7 dell'impasto F0;
- F2.0_1, F2.0_3, F2.0_5 e F2.0_7 dell'impasto F2.0;
- F3.5_1, F3.5_3, F3.5_5 e F3.5_7 dell'impasto F3.5;
- F5.0_1, F5.0_3, F5.0_5 e F5.0_7 dell'impasto F5.0;
- F6.5_1, F6.5_3, F6.5_5 e F6.5_7 dell'impasto F6.5.

4.4.1 Impasto F0

Codice provini	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F0_1	4123	4176	4149,5
F0_2	-	-	-
F0_3	2671	2805	2738
F0_4	-	-	-
F0_5	2692	2844	2768
F0_6	-	-	-
F0_7	3377	3778	3577,5
F0_8	-	-	-
		Media	3863,5

Tabella 4.16 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto F0

I valori evidenziati in rosso nella tabella 4.16 sono stati scartati perché relativi a provini che hanno subito un'errata compattazione con la pressa a taglio giratoria.

4.4.2 Impasto F2.0

Codice provini	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F2.0_1	5039	4755	4897
F2.0_2	-	-	-
F2.0_3	5357	4800	5079
F2.0_4	-	-	-
F2.0_5	4908	5051	4980
F2.0_6	-	-	-
F2.0_7	5679	5674	5676,5
F2.0_8	-	-	-
		Media	5157,9

Tabella 4.17 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto F2.0

4.4.3 Impasto F3.5

Codice provini	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F3.5_1	5101	4729	4915
F3.5_2	-	-	-
F3.5_3	5006	5053	5029,5
F3.5_4	-	-	-
F3.5_5	5900	5317	5608,5
F3.5_6	-	-	-
F3.5_7	5086	5074	5080
F3.5_8	-	-	-
Media			5158,3

Tabella 4.18 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto F3.5

4.4.4 Impasto F5.0

Codice provini	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F5.0_1	4306	4342	4324
F5.0_2	-	-	-
F5.0_3	4786	5267	5026,5
F5.0_4	-	-	-
F5.0_5	4538	4386	4462
F5.0_6	-	-	-
F5.0_7	4699	4732	4715,5
F5.0_8	-	-	-
Media			4632

Tabella 4.19 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto F5.0

4.4.5 Impasto F6.5

Codice provini	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F6.5_1	4967	4512	4739,5
F6.5_2	-	-	-
F6.5_3	4841	5145	4993
F6.5_4	-	-	-
F6.5_5	4761	4706	4733,5
F6.5_6	-	-	-
F6.5_7	4417	4165	4291
F6.5_8	-	-	-
		Media	4689,3

Tabella 4.20 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto F6.5

4.4.6 Confronto

L'istogramma di figura 4.12 evidenzia come varia il valore dell'ITSM in funzione della percentuale di filler calcareo presente nell'impasto. I valori maggiori sono stati ottenuti per le miscele F2.0 e F3.5.

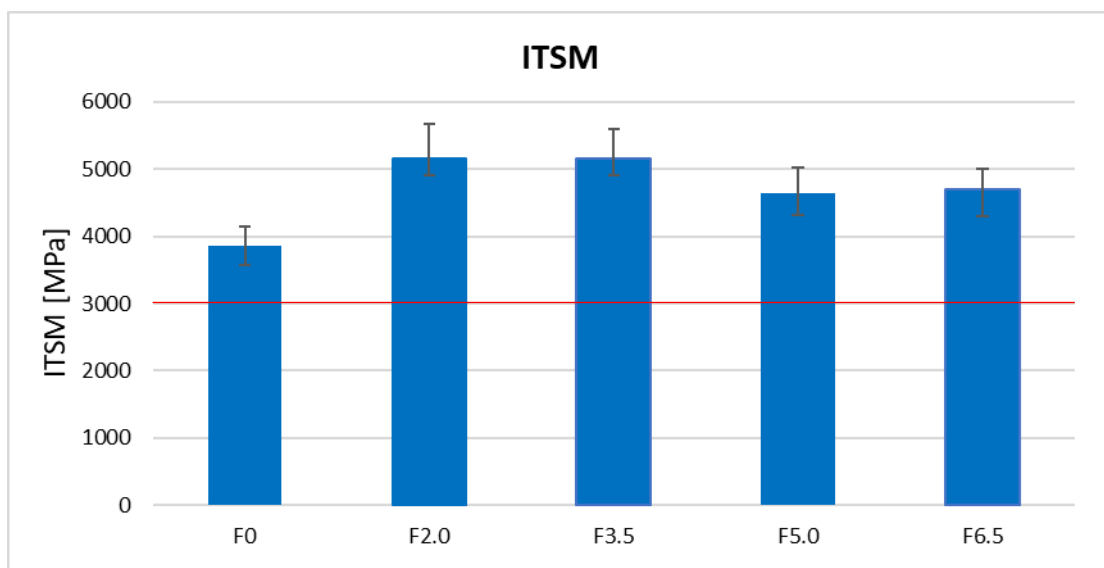


Figura 4.12 - Riepilogo e confronto del valore dell'ITSM di ogni impasto

La linea rossa rappresenta il minimo valore di ITSM a tre giorni secondo il Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano, corrispondente anche a quello del Capitolato ANAS. Tutti i provini confezionati sono risultati idonei.

Il passaggio successivo è rappresentato dalla valutazione del parametro dell'ITSM in funzione della percentuale di passante al setaccio con aperture da 0,063 mm il cui andamento è illustrato nella figura 4.13. Dallo studio della curva risulta evidente che a valori di passante al setaccio da 0,063 mm compresi tra il 5 e il 6% corrispondono ITSM più elevati.

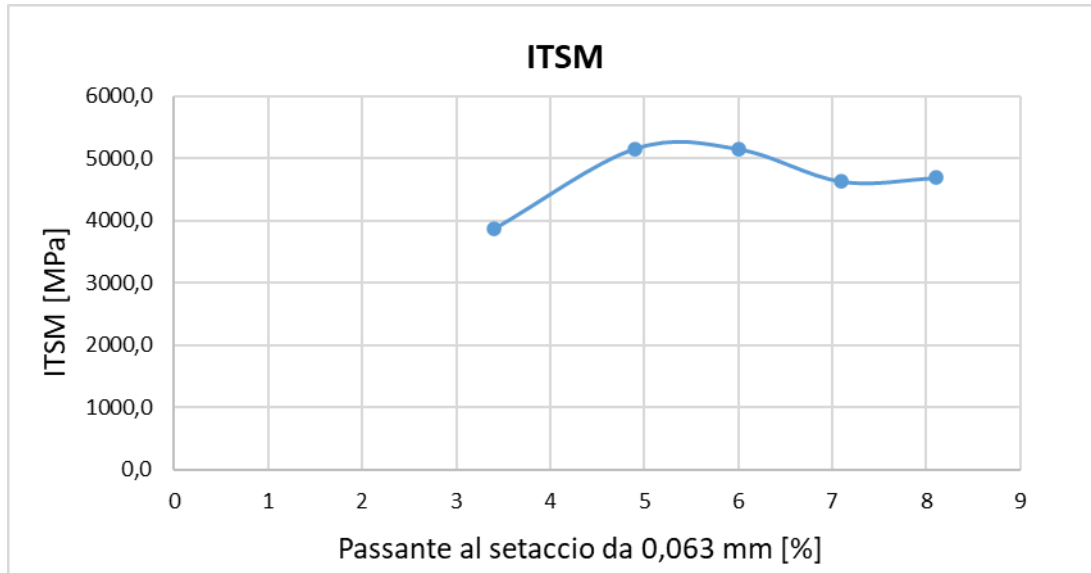


Figura 4.13 – Andamento ITSM in funzione della percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm

Impasto	Passante al setaccio da 0,063 mm [%]	ITSM [MPa]
F0	3,4	3863,5
F2.0	4,9	5157,9
F3.5	6,0	5158,3
F5.0	7,1	4632
F6.5	8,1	4689,3

Tabella 4.21 – Riepilogo e confronto del valore di ITSM di ogni impasto in funzione della percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm

Nella tabella 4.21 si osserva che anche per l'impasto F0, quello senza filler aggiunto, è presente il passante al setaccio da 0,063 mm pari al 3,4%. Tale condizione è dovuta al filler contenuto nel fresato.

4.5 Prove di rottura a trazione indiretta

In questa sezione vengono analizzati i risultati della prova di rottura a trazione indiretta, descritta nel paragrafo 3.2.7, effettuata tre giorni dopo la compattazione dei provini sottoelencati:

- F0_1, F0_3, F0_5 e F0_7 dell'impasto F0;
- F2.0_1, F2.0_3, F2.0_5 e F2.0_7 dell'impasto F2.0;
- F3.5_1, F3.5_3, F3.5_5 e F3.5_7 dell'impasto F3.5;
- F5.0_1, F5.0_3, F5.0_5 e F5.0_7 dell'impasto F5.0;
- F6.5_1, F6.5_3, F6.5_5 e F6.5_7 dell'impasto F6.5.

4.5.1 Impasto F0

Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
F0_1	0,01443	3,419	0,203
F0_2	-	-	-
F0_3	0,01381	3,119	0,167
F0_4	-	-	-
F0_5	0,02780	2,505	0,134
F0_6	-	-	-
F0_7	0,01790	3,954	0,231
F0_8	-	-	-
		Media	0,217

Tabella 4.22 - Valori di ITS relativi ai provini dell'impasto F0

I valori evidenziati in rosso nella tabella 4.22 sono stati scartati perché relativi a provini che hanno subito un'errata compattazione con la pressa a taglio giratoria.

4.5.2 Impasto F2.0

Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
F2.0_1	0,0216	5,872	0,350
F2.0_2	-	-	-
F2.0_3	0,0169	5,629	0,330
F2.0_4	-	-	-
F2.0_5	0,0142	5,976	0,355
F2.0_6	-	-	-
F2.0_7	0,0141	5,027	0,295
F2.0_8	-	-	-
Media			0,333

Tabella 4.23 - Valori di ITS relativi ai provini dell'impasto F2.0

4.5.3 Impasto F3.5

Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
F3.5_1	0,0136	6,502	0,379
F3.5_2	-	-	-
F3.5_3	0,0162	6,182	0,364
F3.5_4	-	-	-
F3.5_5	0,0150	5,714	0,333
F3.5_6	-	-	-
F3.5_7	0,0181	5,818	0,337
F3.5_8	-	-	-
Media			0,353

Tabella 4.24 - Valori di ITS relativi ai provini dell'impasto F3.5

4.5.4 Impasto F5.0

Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
F5.0_1	0,0179	6,529	0,393
F5.0_2	-	-	-
F5.0_3	0,0199	5,422	0,319
F5.0_4	-	-	-
F5.0_5	0,0173	5,967	0,354
F5.0_6	-	-	-
F5.0_7	0,0220	6,416	0,377
F5.0_8	-	-	-
Media			0,361

Tabella 4.25 - Valori di ITS relativi ai provini dell'impasto F5.0

4.5.5 Impasto F6.5

Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
F6.5_1	0,0182	4,909	0,291
F6.5_2	-	-	-
F6.5_3	0,0154	5,523	0,328
F6.5_4	-	-	-
F6.5_5	0,0286	4,985	0,293
F6.5_6	-	-	-
F6.5_7	0,0143	4,182	0,245
F6.5_8	-	-	-
Media			0,289

Tabella 4.26 - Valori di ITS relativi ai provini dell'impasto F6.5

4.5.6 Confronto

L'istogramma di figura 4.14 evidenzia come varia il valore dell'ITS in funzione della percentuale di filler calcareo presente nell'impasto, il cui valore limite è pari a 0,35 MPa per il Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano (linea rossa) e 0,32 MPa per il Capitolato ANAS (linea verde). I valori maggiori dell'ITS sono stati ottenuti per le

miscele F3.5 e F5.0. L'impasto F2.0 soddisfa il limite minimo del Capitolato ANAS e non quello di Bolzano.

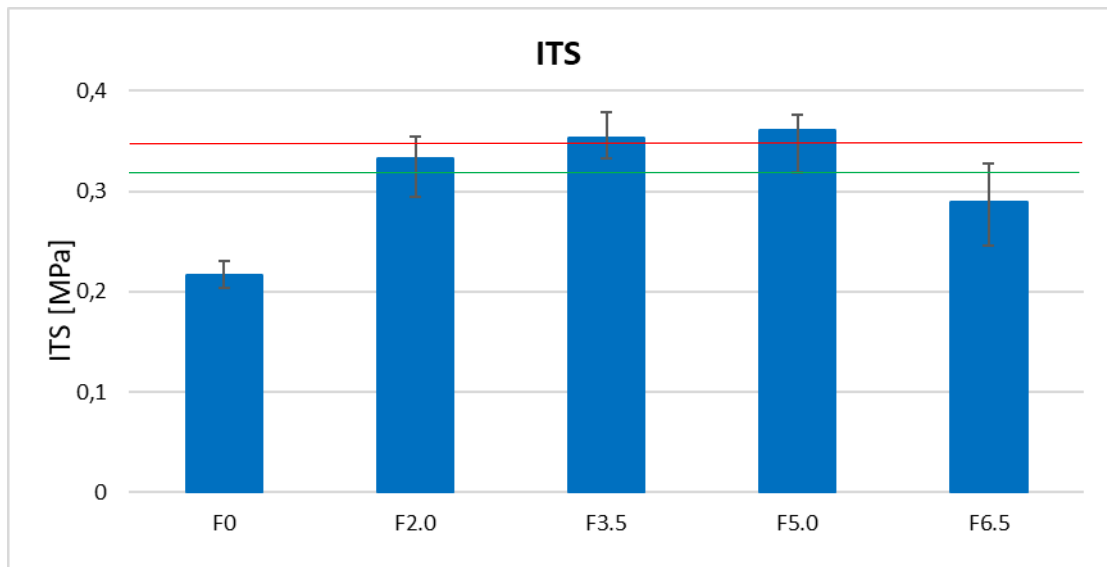


Figura 4.14 - Riepilogo e confronto del valore dell'ITS di ogni impasto

Segue la valutazione del parametro ITS in funzione della percentuale di passante al setaccio con aperture da 0,063 mm il cui andamento è illustrato nella figura 4.15. La curva evidenzia che a valori di passante al setaccio da 0,063 mm compresi tra il 5 e il 7% corrispondono ITS più elevati.

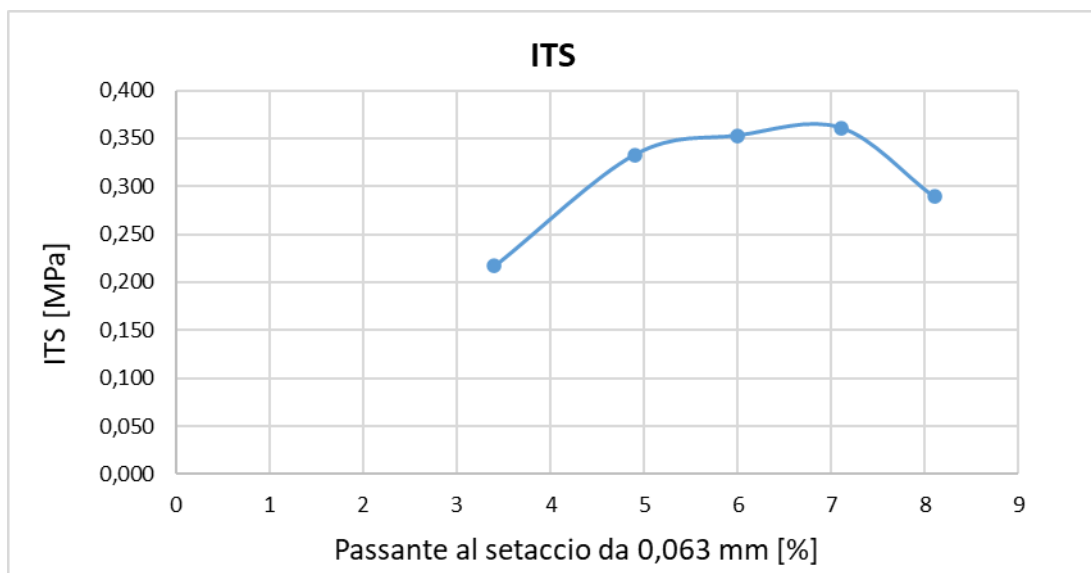


Figura 4.15 – Andamento ITS in funzione della percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm

Impasto	Passante al setaccio da 0,063 mm [%]	ITS [MPa]
F0	3,4	0,217
F2.0	4,9	0,333
F3.5	6,0	0,353
F5.0	7,1	0,361
F6.5	8,1	0,289

Tabella 4.27 – Riepilogo e confronto del valore di ITS di ogni impasto in funzione della percentuale di passante al setaccio da 0,063 mm

La tabella 4.27 mostra che anche per l'impasto F0, quello senza filler aggiunto, è presente il passante al setaccio da 0,063 mm pari al 3,4%. Tale condizione è dovuta al filler contenuto nel fresato.

Conclusioni

La tesi ha avuto per oggetto la determinazione dell'incidenza della quantità di filler, introdotto nelle miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo, sulla caratterizzazione fisica e meccanica stabilendo quali percentuali permettono di ottenere valori rispondenti al Capitolato Speciale d'Appalto per i Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano e al Capitolato ANAS.

Il programma di prove sperimentali, sviluppato presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura – Sezione Infrastrutture – Area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche, è stato condotto su cinque miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo preparate con dosaggio di filler calcareo rispettivamente pari a 0%, 2%, 3.5%, 5% e 6.5%. Le prove di laboratorio, effettuate sui campioni, hanno consentito di determinare:

- i parametri di lavorabilità;
- il modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) tre giorni dopo la compattazione;
- la rottura a trazione indiretta (ITS) tre giorni dopo la compattazione.

L'analisi dei dati ottenuti durante l'attività sperimentale intrapresa ha prodotto le seguenti principali considerazioni:

- all'aumentare della percentuale di filler aggiunto nel campione la lavorabilità delle miscele tende a diminuire;
- al variare del quantitativo di filler introdotto non si rilevano differenze significative sul volume dei vuoti delle miscele;
- tutte le miscele, essendo caratterizzate da valori di ITSM a tre giorni maggiori di 3000 MPa, soddisfano il limite inferiore prescritto dal Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano e dal Capitolato ANAS;
- dal confronto dei valori del modulo di rigidezza a trazione indiretta a tre giorni dopo la compattazione si evidenzia che tra il 5 e il 6% di passante al setaccio da 0,063 mm corrispondono ITSM più elevati;

- i soli impasti F3.5 e F5.0 hanno ottenuto valori di ITS maggiori di 0,35 MPa, soddisfacendo sia le prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano che quelle del Capitolato ANAS, per cui risulta idonea anche la miscela F2.0;
- i valori di ITS maggiori si riscontrano per percentuali di passante al setaccio da 0,063 mm comprese tra il 5 e il 7%.

Il risultato principale dello studio delle miscele ha determinato che ad una percentuale pari al 6% di passante al setaccio con aperture da 0,063 mm corrisponde una maggiore rigidità e resistenza ultima, riscontrando un valore dell'ITSM pari a 5158 MPa e dell'ITS uguale a 0,353 MPa. Di contro un quantitativo eccessivo di filler comporta il ritardo di evaporazione dell'acqua all'interno della miscela con conseguente ritardo dello sviluppo delle prestazioni nel tempo, mentre un quantitativo inferiore provoca un peggioramento in quanto il fresato contiene del passante che in realtà è polvere di bitume e non filler calcareo, e che quindi ha un minor potere legante.

Bibliografia

- [1] UNI EN 13043, 2013, "Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico";
- [2] UNI EN 933-1, 2012, "Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura";
- [3] CNR BU 139, 1992, "Percentuale di frantumato di aggregati";
- [4] UNI EN 13282-1, 2013, "Leganti idraulici per impieghi stradali - Parte 1: Leganti idraulici per impieghi stradali a indurimento rapido - Composizione, specifiche e criteri di conformità";
- [5] UNI EN 13282-2, 2015, "Leganti idraulici per impieghi stradali - Parte 2: Leganti idraulici per impieghi stradali a normale indurimento - Composizione, specificazioni e criteri di conformità";
- [6] UNI EN 1008, 2003, "Acqua d'impasto per il calcestruzzo - Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di recupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo";
- [7] UNI EN 12697-31, 2019, "Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria";
- [8] UNI EN 12697-6, 2020, "Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi";
- [9] UNI EN 12697-23, 2018, "Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi";
- [10] UNI EN 12697-26, 2018, "Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 26: Rigidezza";
- [11] UNI EN 1097-6, 2013, "Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua";
- [12] UNI EN 12697-5, 2019, "Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 5: Determinazione della massa volumica massima";

- [13] UNI EN 12697-8, 2019, “Miscele bituminose – Metodi di prova - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”;
- [14] Anas, “Capitolato Speciale di Appalto: Norme Tecniche per l’esecuzione del contratto – Parte 2”, 2021;
- [15] Capitolato Speciale d’appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano;
- [16] Chen D., “Evaluation of long-term performance of cold in-place recycled asphalt roads”, 2006;
- [17] Collepardi M., “Il nuovo calcestruzzo”, 2014;
- [18] Ippoliti D., “Influenza del tipo di emulsione sul livello prestazionale delle basi a freddo”, 2021;
- [19] Martínez Rossa M. S., “Analisi e modellazione del fenomeno dell’accumulo di deformazioni permanenti in miscele bituminose per strati di usura”, 2018;
- [20] Santagata F. A., “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.1: Progettazione”, 2016;
- [21] Santagata F. A., “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali – Vol.2: Costruzione, gestione e manutenzione”, 2016;
- [22] Viola P., “Caratterizzazione avanzata in laboratorio di materie prime secondarie rigenerate o stabilizzate con emulsione di bitume e leganti cementizi”, 2013.

Ringraziamenti

I più sentiti ringraziamenti al Prof. Ing. Maurizio Bocci, relatore di questa tesi di laurea, per la passione che è stato in grado di trasmettere durante i suoi corsi, chiave fondamentale per spingermi ad approfondire l'ambito infrastrutturale.

Desidero inoltre ringraziare l'Ing. Carlo Carpani e l'Ing. Emiliano Prospero, che mi hanno assistito nelle varie fasi della sperimentazione. A loro va il mio più caro augurio per una splendida carriera.