



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

**Impiego delle fibre nel riciclaggio a freddo del
conglomerato bituminoso di recupero**

**Use of fibers in the cold recycling of reclaimed
asphalt pavement**

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Emiliano Prosperi

Tesi di Laurea di:

Riccardo Lezzi

Anno Accademico 2020 – 2021

Alla mia Famiglia

Sommario

Capitolo 1 - Introduzione	1
Capitolo 2 - Stato dell'arte	3
2.1 Introduzione alle strade	3
2.2 Stratigrafia Stradale	4
2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso	5
2.3 Ecosostenibilità ed economia circolare	8
2.3.1 Riutilizzo di materiali nelle costruzioni stradali	10
2.4 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali	11
2.4.1 Tecniche di riciclaggio	13
2.5 Riciclaggio a caldo	14
2.5.1 In impianto	14
2.5.2 In situ	16
2.6 Riciclaggio a freddo	17
2.6.1 In impianto	18
2.6.2 In situ	20
2.6.2.1 Vantaggi e Svantaggi	20
2.6.2.2 Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive	24
2.7 Riciclaggio a freddo dello strato di base	28
2.8 Requisiti di capitolato ANAS	31
2.8.1 Materiali inerti	31
2.8.2 Leganti e additivi	31
2.8.3 Miscela	32
2.8.4 Requisiti di accettazione	33
2.8.4.1 Studio preliminare	33

Capitolo 3 - Materiali	35
3.1 RAP	35
3.2 Filler calcareo	37
3.3 Emulsioni Bituminose.....	39
3.3.1 Emulsione Modificata con Polimeri SBS – RIGIVAL CM	42
3.4 Cemento Portland	43
3.4.1 Idratazione, presa e indurimento	44
3.4.1.1 Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento	46
3.4.2 Proprietà e ruolo del cemento nella pavimentazione	47
3.5 Acqua.....	48
3.5.1 Ruolo dell'acqua.....	49
3.6 Fibre polimeriche	50
3.6.1 Il materiale	50
3.6.2 Le proprietà.....	51
3.6.3 I campi di applicazione	52
3.6.4 Prestazioni del conglomerato bituminoso con FORTA FI.....	52
3.6.4.1 Mix design.....	52
3.6.4.2 Determinazione del contenuto dei vuoti secondo UNI EN 12697-31	53
3.6.4.3 Stabilità, scorrimento e rigidità – Prova Marshall UNI EN 12697-30,34,12	54
3.6.4.4 Resistenza a trazione indiretta (T_0 e T_{15}) (UNI EN 12697-23).	55
3.6.4.5 Prova di ormaiamento (Wheel Tracking) UNI EN 12697-22...	55
3.6.5 Sintesi delle prestazioni tra CB -FORTA FI e CB - Hard.....	57
3.6.6 Raccomandazioni per l'uso	58
Capitolo 4 - Test Methods e Programma Sperimentale	59

4.1	Apparecchiature e protocolli di prova	59
4.1.1	Analisi granulometrica	59
4.1.2	Massa volumica ed assorbimento degli aggregati.....	62
4.1.2.1	Procedura per aggregati di pezzatura 4 mm – 31,5 mm	64
4.1.2.2	Procedura per aggregati di pezzatura 0,063 mm – 4 mm.....	66
4.1.3	Preparazione dei provini	68
4.1.4	Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)	74
4.1.5	Determinazione delle proprietà volumetriche	82
4.1.5.1	Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5)	82
4.1.5.2	Determinazione della massa volumica apparente (UNI EN 12697-6)	83
4.1.5.3	Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8).....	83
4.1.6	Prova di Modulo a Trazione Indiretta (UNI EN 12697-26).....	84
4.1.7	Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)	97
4.1.7.1	Sensibilità all'acqua	101
4.1.7.2	Coefficiente CTI ed energie	102
4.2	Programma Sperimentale	102
4.2.1	Fase preliminare.....	103
4.2.1.1	Classificazione del materiale	103
4.2.1.2	Elaborazione dei dati del picnometro	106
4.2.1.3	Miscele di prova.....	108
4.2.1.4	Confronto varie miscele fase preliminare	114
4.2.2	Scelta della miscela definitiva	115
4.2.3	Seconda fase	116
4.2.3.1	Codifica provini	116

Capitolo 5 - Analisi dei risultati	118
5.1 Riferimento	118
5.1.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità	119
5.1.1.1 Impasto CR.....	120
5.1.1.2 Impasto DR.....	121
5.1.1.3 Impasto ER	122
5.1.1.4 Impasto GR	123
5.1.2 Perdita di acqua	124
5.1.2.1 Impasto CR.....	124
5.1.2.2 Impasto DR.....	124
5.1.2.3 Impasto ER	125
5.1.3 Proprietà volumetriche dei provini.....	125
5.1.4 Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	126
5.1.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	127
5.1.5.1 Calcolo CTI ed Energie	127
5.1.6 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS	132
5.2 Fibre.....	133
5.2.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità	133
5.2.1.1 Impasto AF0.2	134
5.2.1.2 Impasto BF0.2	135
5.2.1.3 Impasto CF0.2	136
5.2.2 Perdita di acqua	137
5.2.2.1 Impasto AF0.2	137
5.2.2.2 Impasto BF0.2	137
5.2.2.3 Impasto CF0.2	138
5.2.3 Proprietà volumetriche dei provini.....	138

5.2.4	Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	138
5.2.5	Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	140
5.2.5.1	Calcolo CTI ed Energie	140
5.2.6	Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS	145
5.3	Confronto tra le famiglie	146
5.3.1	Parametri di lavorabilità.....	146
5.3.2	Percentuale dei vuoti	146
5.3.3	Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	147
5.3.4	Rottura a Trazione Indiretta (ITS).....	149
5.3.5	CTI ed Energie	150
5.3.6	Sensibilità all'acqua	150
Capitolo 6 - Conclusioni		152
Bibliografia e Sitografia.....		153
Ringraziamenti.....		i

Capitolo 1 - Introduzione

Il corpo stradale è costituito da vari strati sovrapposti, aventi materiali e spessori diversi. Il loro compito è quello di sopportare le azioni indotte dal traffico, trasmetterle e distribuirle al sottofondo, ovvero il terreno su cui poggiano gli strati. I principali veicoli responsabili del degrado della pavimentazione stradale sono i mezzi pesanti, per via della loro massa notevolmente superiore rispetto a quella del traffico di automobili e motocicli. Questo comporta sollecitazioni maggiori sul corpo stradale della pavimentazione.

Quando un'infrastruttura viaria non è più in grado di garantire i requisiti minimi di comfort e sicurezza, è necessario attuare degli interventi di ripristino e manutenzione. La realizzazione di questi interventi spesso prevede la demolizione di tutta o di una parte della pavimentazione ed il successivo rifacimento. Questo comporta una grande quantità di conglomerato bituminoso demolito, comunemente definito "RAP" o "Fresato", che in assenza di apposite prescrizioni viene trasportato in discarica e trattato come rifiuto speciale.

Negli ultimi anni per la necessità crescente di un'economia sostenibile e di maggiore ecosostenibilità delle grandi opere edilizie si cerca di sviluppare sempre nuove tecniche finalizzate al riutilizzo delle materie prime e al risparmio delle risorse naturali per le generazioni future. Tutto questo limitando l'impatto che le costruzioni hanno sull'ambiente sia in termini di consumo di materie prime naturali sia come inquinamento acustico, atmosferico e del suolo.

Negli ultimi decenni la ricerca in campo stradale si sta spingendo verso soluzioni sempre più eco-sostenibili. In tal senso, la sperimentazione svolta si posiziona perfettamente in questa direzione, in quanto l'obiettivo è stato quello di arrivare ad una maggiore conoscenza prestazionale di recenti tecnologie per il risanamento stradale incentrate sul riutilizzo di determinati componenti della pavimentazione.

Nei prossimi capitoli, infatti, si analizzeranno i risultati prestazionali forniti da un conglomerato bituminoso, utilizzato per lo strato di base, ottenuto attraverso il riciclo con la tecnica del *riciclaggio a freddo* della pavimentazione esistente in situ. In particolare, si è andati a valutare

l'incidenza sul comportamento complessivo del materiale, confezionando diversi provini con lo stesso materiale aggiungendo delle fibre polimeriche plastiche e confrontando quest'ultimi con la medesima miscela senza l'impiego di fibre.

La sperimentazione è stata condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche e la caratterizzazione meccanica è stata eseguita con:

- Prove di Modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM)
- Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)
- Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITSr

La presente tesi si sviluppa in sei capitoli:

➤ Capitolo 1 – Introduzione

➤ Capitolo 2 – Stato dell'arte:

Vengono espresse alcune considerazioni di carattere generale sulla stratigrafia stradale soffermandosi sulle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Viene descritto il riciclaggio delle pavimentazioni, con particolare attenzione al riciclaggio a freddo.

➤ Capitolo 3 – Materiali:

Vengono illustrati i materiali utilizzati e le loro caratteristiche.

➤ Capitolo 4 – Test Methods e Programma Sperimentale:

Vengono elencate tutte le procedure di laboratorio eseguite, il confezionamento delle miscele e viene illustrato il programma sperimentale su cui si è sviluppata la presente tesi.

➤ Capitolo 5 – Analisi dei risultati:

Si riportano i risultati ottenuti dalle varie prove eseguite, i confronti, grafici e tabelle opportunamente presentati e commentati.

➤ Capitolo 6 – Conclusioni

Capitolo 2 - Stato dell'arte

2.1 Introduzione alle strade

Si definisce strada un'infrastruttura di trasporto destinata alla circolazione dei veicoli su ruota e marginalmente a pedoni ed animali, generalmente poggiante sul suolo oppure sollevata con strutture apposite (ponti).

Nel corso del tempo le tecnologie di costruzione di una strada si sono sempre più evolute. Un contributo molto importante fu dato dai Romani. Gli obiettivi principali erano quello di realizzare delle pavimentazioni con un buon livello di affidabilità, durabilità e percorribilità.

Le strade romane furono le prime ad essere realizzate secondo uno schema a strati sovrapposti e si notò che questo tipo di configurazione garantiva adeguati livelli di portanza, regolarità e vita utile.

La configurazione tipo di una strada romana prevedeva l'utilizzo dei seguenti elementi: pietre poste di taglio, ghiaia, ciottoli, pietrisco e lastricato, raggiungendo uno spessore di circa 0,9 metri.

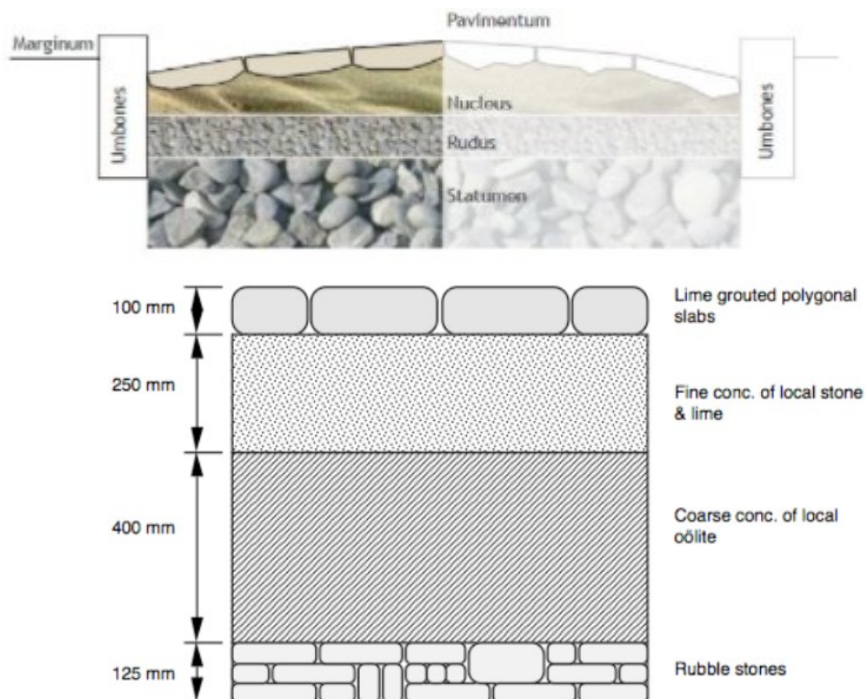


Figura 2.1 - Configurazione tipica di una strada romana e suoi spessori comuni

La costruzione vera e propria della strada romana iniziava con lo scavo di due trincee poco profonde e parallele fra loro (sulci) che definivano la larghezza prescelta per la strada. Il terreno incoerente fra i due sulci veniva poi rimosso e lo scavo proseguiva fino a raggiungere un livello di terreno stabile, sul quale impostare opportunamente la pavimentazione.

Quest'ultima era composta da quattro strati diversi:

- lo statumen, corrispondente all'attuale fondazione, in pietre di dimensioni tali da poter essere movimentate a mano;
- la ruderatio, o base, costituita da aggregato lapideo frantumato, legato con calce;
- il nucleus, composto di aggregato più piccolo del precedente, che costituiva il letto di posa del pavimentum;
- pavimentum, o strato di usura. Il pavimentum delle strade principali era realizzato con i basoli, grandi pietre aventi superficie piatta e forma a cuneo, in modo da penetrare solidamente nel terreno [51].

Con il passare dei secoli questo sistema costruttivo si è ovviamente evoluto utilizzando materiali e metodi più innovativi fino alle tecnologie e metodologie realizzative attuali che prevedono l'utilizzo del conglomerato bituminoso.

2.2 Stratigrafia Stradale

Attualmente il concetto di strada è associato ad un elemento multistrato in cui ogni componente ha un ruolo ben preciso. Una pavimentazione, o sovrastruttura, consiste nella parte superiore del corpo stradale, cioè quell'insieme di strati di vario materiale e spessore che poggiano sul sottofondo.

La pavimentazione svolge due compiti fondamentali riassumibili nei concetti di sicurezza e comfort di marcia per gli utenti. Al fine di soddisfare entrambe queste esigenze, è necessario realizzare sovrastrutture che siano in grado di [1]:

- Trasmettere e distribuire i carichi di traffico, opportunamente attenuati, al sottofondo, ovvero garantire un'adeguata *portanza*.
- Resistere ai fenomeni di degrado strutturale.

- Proteggere il sottofondo dall'azione degli agenti atmosferici, in particolare dalla penetrazione di acqua e dal gelo.
- Garantire un adeguato livello di *regolarità* e *aderenza* del piano viabile.

Con l'aumento del volume di traffico, nello specifico di quello costituito dai mezzi pesanti, la sovrastruttura stradale viene sottoposta a incrementi di carico sempre maggiori con un conseguente degrado accelerato delle sue prestazioni funzionali. Le sovrastrutture stradali vengono progettate con una vita utile limitata (circa 20 anni) sia per ragioni economiche sia di fattibilità realizzativa, per questo la rete viaria italiana risulta ormai datata e con lieve margine per la realizzazione di nuove infrastrutture; quindi risulta sempre più importante intervenire sulle arterie esistenti con operazioni di manutenzione e risanamento con la finalità di ripristinare le caratteristiche tecniche e funzionali ottimali della pavimentazione stradale.

Ne consegue che l'obiettivo principale dell'ingegneria stradale risulta attualmente quello di individuare tecniche efficienti ed ecosostenibili per arginare e risanare lo stato di degrado delle pavimentazioni allo scopo di migliorarne le condizioni e la vita utile piuttosto che sviluppare nuove reti stradali.

2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

A seconda del tipo di materiali utilizzati le pavimentazioni stradali si distinguono in rigide, semirigide e flessibili.

Una pavimentazione *rigida* prevede l'utilizzo di lastre di calcestruzzo poste sopra ad una fondazione in misto granulare o eventualmente in misto granulare e misto cementato [1].

Una pavimentazione *semirigida*, argomento oggetto del presente elaborato, è composta generalmente da quattro strati:

- a) Strato d'usura, o tappeto (3-6 cm)**: è lo strato della pavimentazione a diretto contatto con le ruote dei veicoli. Su di esso vengono applicati direttamente i carichi del traffico, ma il suo compito principale non è strutturale: infatti deve garantire sicurezza e comfort di marcia per cui viene realizzato con aggregati che possiedono elevate caratteristiche di aderenza, rugosità e resistenza alle azioni tangenziali (solitamente basalti o aggregati di natura silicea). È realizzato in conglomerato bituminoso (i.e.

aggregati lapidei + legante bituminoso) che, a seconda delle esigenze, può essere chiuso, semichiuso o aperto, in relazione alla porosità (i.e. percentuale di vuoti) che caratterizza lo strato. Ovviamente un conglomerato chiuso o semichiuso garantisce prestazioni meccaniche superiori rispetto ad uno aperto, generalmente utilizzato per realizzare una pavimentazione drenante [8].

- b) Strato di collegamento (Binder) (6-8 cm):** strato il cui compito è quello di collegare gli strati di usura e base e di trasferire i carichi dalla superficie agli strati più profondi. Fornisce inoltre un contributo per assorbire le azioni flessionali indotte dai carichi. Generalmente è realizzato in conglomerato bituminoso chiuso o semichiuso [1].
- c) Strato di Base (8-30 cm):** strato il cui ruolo principale è l'assorbimento delle sollecitazioni flessionali indotte dai carichi, la sua funzione quindi è principalmente strutturale. Proprio per questo motivo il suo spessore è molto variabile: dipende dalle caratteristiche del sottofondo, dal clima e dalla quantità di traffico pesante. Viene realizzato in misto cementato, in conglomerato bituminoso a caldo con eventuale impiego di massimo il 30% di materiale riciclato oppure in conglomerato bituminoso riciclato a freddo in cui la miscela è composta da almeno il 70% di materiale fresato. La dimensione massima degli aggregati è più elevata e la percentuale di bitume è ridotta rispetto agli strati superiori (il che si traduce in una maggiore porosità). Può capitare in alcuni casi che esso sia realizzato in misto granulare, cioè senza legante, e ciò avviene se la richiesta di resistenza a trazione è bassa. Nel caso del riciclaggio a freddo è previsto l'impiego di emulsione bituminosa: gli aggregati sono miscelati con emulsione di bitume modificato (dosaggi tipici compresi tra 3,5% e 4,0% in peso sulla miscela di aggregati) e cemento (dosaggi tra 1,5 – 2,0%) [6]. A differenza del misto cementato, in questa circostanza il cemento non funge da legante, ma rappresenta un elemento fondamentale per la formazione del mastice che lega gli aggregati lapidei e permette di regolare la velocità di rottura dell'emulsione. Tutti questi aspetti fanno sì che la miscela riciclata a freddo con emulsione risulti meno fragile delle corrispondenti miscele realizzate con bitume schiumato o di quelle in misto cementato, garantendo conseguentemente maggiore resistenza a fatica [6].
- d) Strato di Fondazione (15-35 cm):** strato il cui ruolo principale è quello di trasferire i carichi al sottofondo. Viene frequentemente realizzato in misto granulare, quindi non

legato, ma nelle pavimentazioni semirigide può essere anche in misto cementato (legato). Se per motivi economici o di indisponibilità del materiale non si può usare il misto granulare, si ricorre alla sabbia stabilizzata con calce, cemento o bitume. Alla luce della sempre maggiore importanza delle tematiche ambientali e dell'ecosostenibilità, si è arrivati a realizzare questo strato anche in conglomerato riciclato a freddo in cui il legante bituminoso è introdotto per mezzo dell'emulsione, senza avere eccessive perdite prestazionali [9].

- e) **Sottofondo (50-100 cm):** costituisce il piano di posa della fondazione. Il suo ruolo principale è quello di garantire un'adeguata portanza, che è determinante per la stabilità dell'intera pavimentazione: infatti, una mancanza di portanza comporterebbe una perdita di funzionalità e di vita utile. Proprio per questo motivo il terreno di sottofondo deve rispettare alcune caratteristiche fornite dalla norma CNR-UNI 10006, secondo cui la portanza di un sottofondo viene classificata come buona se è pari a $15 \text{ kN} / \text{cm}^2$; media se è pari a $9 \text{ kN} / \text{cm}^2$ o scarsa se è pari a $3 \text{ kN} / \text{cm}^2$. Se la portanza è minore di $3 \text{ kN} / \text{cm}^2$ si dovrà attuare una bonifica del terreno oppure una sostituzione.

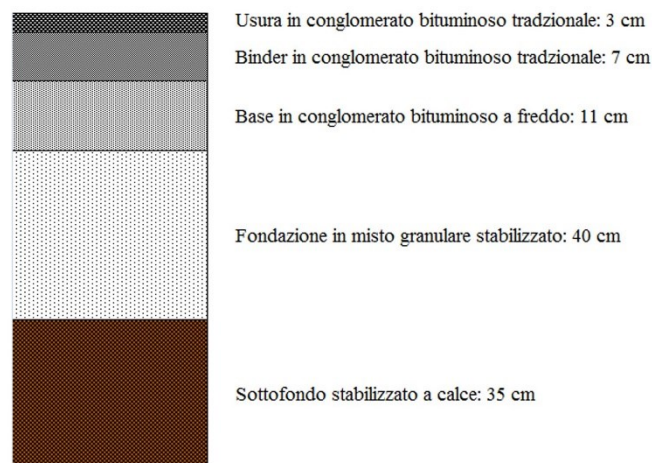


Figura 2.2 - Stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale semirigida

Una pavimentazione *flessibile* ha una composizione del tutto simile a quella semirigida, con l'unica differenza che lo strato di base è realizzato in conglomerato bituminoso e presenterà inferiormente uno strato di sottobase in misto cementato [1].

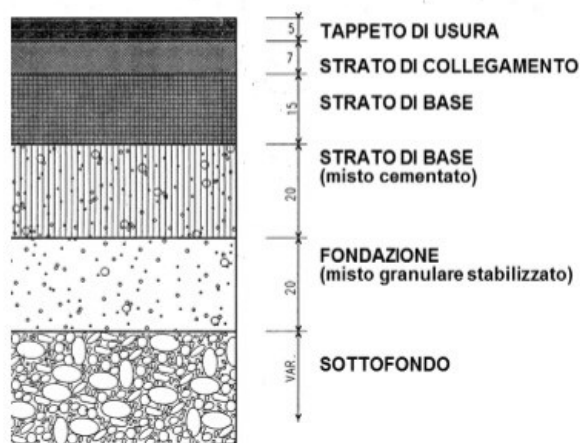


Figura 2.3 - Stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale flessibile

2.3 Ecosostenibilità ed economia circolare

L'ecosostenibilità è l'attività umana che regola la propria pratica secondo assunti ecologisti nel quadro dello sviluppo sostenibile [S2]. Il concetto alla base dell'ecosostenibilità è il rinnovamento delle risorse: bisogna agire in un modo da non modificare i delicati equilibri del nostro pianeta. Si definiscono quindi ecosostenibili tutte quelle pratiche comportamentali per cui si fa in modo di impattare il meno possibile sulle risorse naturali disponibili, in modo che il consumo di risorse sia tale per cui la generazione successiva riceva la stessa quantità di risorse che l'attuale ha ricevuto dalla generazione precedente.

Alla base dello stile di vita ecosostenibile c'è il passaggio da un'economia di tipo lineare a una di tipo circolare.

L'economia circolare è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile. In questo modo si estende il ciclo di vita dei prodotti, contribuendo a ridurre i rifiuti al minimo. Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all'interno del ciclo produttivo generando ulteriore valore. I principi dell'economia circolare contrastano con il tradizionale modello economico lineare, fondato invece sul tipico schema "estrarre, produrre, utilizzare e gettare". Il modello economico tradizionale dipende dalla disponibilità di grandi quantità di materiali ed energia facilmente reperibili e a basso prezzo [S3].



Figura 2.4 - Schema di funzionamento dell'Economia Circolare

Le fasi principali per un corretto funzionamento dell'economia circolare sono 5 [1]:

- Progettazione: ovvero progettare i prodotti tenendo già in considerazione il loro impiego a fine vita, quindi prevedere sin da subito una facilità nello smontaggio o la possibilità di ristrutturazione.
- Modularità e versatilità del prodotto per potersi adattare al cambiamento delle condizioni esterne.
- Utilizzo di energie rinnovabili.
- Approccio ecosistemico: individuare le relazioni causa-effetto tra le diverse componenti al fine di individuare le soluzioni migliori considerando l'intero sistema.
- Recupero dei materiali: favorire più possibile il riutilizzo di materie prime usate, ma comunque garantendo prestazioni adeguate. Attualmente l'estrazione di materie prime vergini e la produzione dei materiali è responsabile del 45% delle emissioni di CO₂ ogni anno.

Ne consegue quindi che l'aumento di domanda delle materie prime, direttamente collegato all'aumento della popolazione mondiale, porterà in un futuro non molto lontano ad una scarsità di risorse e di conseguenza ad un aumento delle emissioni di CO₂ [1].

Anche in ambito edilizio e dell'architettura l'ecosostenibilità è diventato un argomento fondamentale: sempre più con l'avanzare del tempo si progettano e si costruiscono edifici con materiali a basso impatto ambientale, oppure si demoliscono vecchi edifici con l'intenzione di separare e recuperare le varie componenti per essere riutilizzate.

2.3.1 Riutilizzo di materiali nelle costruzioni stradali

In ambito stradale la comunità scientifica produce ormai moltissime ricerche riguardo il riutilizzo di vecchie pavimentazioni demolite e di ogni genere di materiale di scarto ottenuto dalla produzione industriale. Di seguito vengono accennati alcuni dei materiali comunemente utilizzati:

- Polverino di gomma

Ottenuto dalla demolizione di vecchi pneumatici che altrimenti andrebbero depositati in discarica. Il polverino può essere aggiunto nel bitume o nella miscela ed andare a costituire gli Asphalt Rubber, con benefici ampiamente dimostrati [15].



Figura 2.5 - Polverino in gomma

- Scorie nere

Sono scorie siderurgiche derivanti dai processi produttivi con fornaci. Questo materiale, se non reimpiegato, deve essere smaltito con particolare attenzione alla sicurezza, con relativi costi economici e ambientali. Tuttavia, alcuni studi hanno dimostrato che questo materiale è in grado di sostituirsi, a livello funzionale, all'aggregato per l'impiego stradale: grazie alle sue proprietà, viene attualmente impiegato come materiale granulare in sottofondi e fondazioni e come aggregato di alta qualità negli strati legati a bitume [S4].



- Scorie bianche

Sono sottoprodotti secondari delle lavorazioni siderurgiche. Vengono utilizzate come integrazione a cemento o calce nei conglomerati con legante idraulico e nelle stabilizzazioni del suolo [1].

- Scorie da incenerimento

Come indicato dal nome, sono scorie derivanti dall'incenerimento di rifiuti. Normalmente verrebbero stoccate in discarica, mentre in ambito stradale possono essere riutilizzate come alternativa ai filler e agli aggregati [1].

- RAP

Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), comunemente definito *fresato*, è il conglomerato bituminoso ottenuto dalla demolizione delle vecchie pavimentazioni. È senza dubbio il materiale più facilmente riciclabile e può essere riutilizzato più volte. In questo materiale è possibile recuperare l'aggregato ma anche il bitume presente [1].



Figura 2.7 - RAP

2.4 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Il riciclaggio in ambito stradale è diventato un argomento di primaria importanza nel corso degli ultimi decenni. In passato, quando non si utilizzavano tecniche di riciclaggio, si era soliti asportare la vecchia pavimentazione da rigenerare e costruirne una nuova utilizzando nuove materie prime, nuovi aggregati e nuovo bitume. Questo comportava un notevole impatto ambientale per l'estrazione e la produzione di nuove materie prime da impiegare e

comportava la produzione di grandi volumi di materiale di risulta da dover destinare allo stoccaggio e al trattamento.

Si è quindi giunti alla consapevolezza che il materiale che si ottiene dalla demolizione di una vecchia pavimentazione, detto comunemente *fresato* o *RAP (Reclaimed Asphalt Pavements)*, può essere riutilizzato per la costruzione di nuovi strati delle pavimentazioni. Le motivazioni che spingono verso questa direzione sono molteplici [1]:

- riduzione dell'impiego di materie prime vergini;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell'energia;
- vantaggi economici;
- vantaggi tecnici.

In Italia i primi tentativi di riciclaggio risalgono agli anni '70, con la fresatura degli strati superficiali, fino ad arrivare nel 1983 ai primi lavori di riciclaggio in situ con impianti mobili e riutilizzo del 100% del materiale fresato (Autostrada I.R.I.-tratto Magliano Sabina-Fiano). Infine, nel 1989 si hanno i primi esempi di riciclaggio cosiddetto *a freddo*, con l'utilizzo di emulsioni bituminose, mediante appositi treni di riciclaggio. Negli anni successivi si è cercato di ottimizzare il processo al fine di ridurre il principale problema di questa tecnica, ovvero i tempi di attesa prima della riapertura al traffico, che inizialmente erano di 3-4 giorni [1].

Nonostante ciò, in Italia questa filosofia di progettazione non viene sufficientemente abbracciata: infatti ad oggi solamente il 15% del conglomerato bituminoso demolito viene riciclato e questo dato, se si confronta con quello di altri paesi europei, è molto basso. Ciò, secondo l'AIPCR (comitato italiano dell'Associazione Mondiale della Strada), può con ogni probabilità dipendere da [2]:

- carenza di normativa tecnica di riferimento;
- legislazione inadeguata;
- scarsa conoscenza da parte della stazione appaltante, dei vantaggi ottenibili dalle tecniche, anche a causa della loro modesta diffusione;

- un comune convincimento che materiali e tecniche di riciclaggio, siano più onerosi rispetto a quelli tradizionali.

Paese	Produzione annuale di conglomerati t·10 ⁶	Produzione annuale di fresato t·10 ⁶	Percentuale di impiego del fresato %
Francia	38,0	7,0	25
Germania	63,5	16,0	80
Svizzera	4,7	1,8	30
Paesi Bassi	7,5	3,0	100
Regno Unito	27,5	8,0	90
Usa	515,0	50,0	80
Giappone	70,1	22,0	80
Italia	36,3	12,0	15

Tabella 2.1 - Produzione annuale di conglomerato bituminoso e percentuali di materiale recuperato

Incentivare l'utilizzo delle tecniche di riciclaggio, dal punto di vista della salvaguardia ambientale, comporta innanzitutto:

- Adottare una filosofia progettuale basata sul criterio di riutilizzare tutto il materiale di risulta, in tutti i cicli di manutenzione futuri;
- Utilizzare il più possibile tecniche che mirino al recupero del 100% del materiale;
- Adottare tecnologie che salvaguardino il più possibile l'ambiente, e sotto tutti gli aspetti.

In merito all'ultimo punto è anche importante specificare che la migliore soluzione è quella del riciclaggio in situ, ove possibile, in quanto riduce contemporaneamente i costi, l'inquinamento ambientale e i consumi energetici derivanti dai continui trasporti tra cantiere e impianto. Nel caso in cui si ha a che fare con riciclaggio a caldo è preferibile utilizzare la procedura in impianto poiché risulta meno inquinante.

2.4.1 Tecniche di riciclaggio

Le tecniche attualmente a disposizione nell'ambito del riciclaggio, possono essere divise in:

- Riciclaggio in impianto fisso;
- Riciclaggio in situ.

Un'ulteriore differenziazione può essere fatta in relazione al metodo con il quale viene effettuato il confezionamento del nuovo conglomerato:

- Riciclaggio a caldo;
- Riciclaggio a freddo.

Oltre alle due citate, è possibile adottare anche una tecnica riguardante le miscele bituminose tiepide; tuttavia, quest'ultima tecnologia è attualmente disponibile solo in impianti fissi, e sarà pertanto veramente efficiente quando ne sarà possibile la diffusione in impianti mobili.

Relativamente alle altre tipologie invece, esse possono combinarsi tra loro, potendo avere sia negli impianti fissi che negli impianti mobili, possibilità di riciclaggio sia a caldo che a freddo.

Segue una trattazione generale dei vari casi, con particolare enfasi sull'argomento di questa tesi, ovvero il riciclaggio a freddo.

2.5 Riciclaggio a caldo

2.5.1 In impianto

Si parla di riciclaggio a caldo (HMA, Hot Mix Asphalt) quando il confezionamento del conglomerato bituminoso prevede un riscaldamento del fresato e dell'aggregato lapideo di primo impiego oltre i 150°C. Le miscele sono generalmente composte da:

- Fresato in proporzioni variabili
- Aggregati lapidei vergini
- Bitume tradizionale o modificato
- Eventuali ACF, ovvero degli additivi atti a ringiovanire il bitume invecchiato.

Si è soliti inserire nuovi aggregati, nuovo bitume e additivi poiché altrimenti si avrebbe un materiale troppo rigido e fragile per la realizzazione di un nuovo strato a causa del cambiamento di proprietà del bitume, che ha subito invecchiamento [3].

La realizzazione delle miscele avviene in impianti fissi di produzione, si riesce quindi ad ottenere un'elevata precisione nei dosaggi. È sicuramente la tecnica che riesce a conferire prestazioni più elevate al conglomerato riciclato ma al contempo non si riesce a reimpiegare il 100% del conglomerato esistente, in particolare la percentuale di riciclaggio raggiungibile dipende dal tipo di impianto e dalla configurazione adottata:

- Impianto discontinuo

È la tipologia di impianto più diffusa in Italia, permette una elevata flessibilità di utilizzo e un miglior controllo di qualità del prodotto finito, oltre a una ridotta emissione di fumi grazie alla presenza del filtro. Tuttavia, ha una produttività più bassa dell'impianto continuo ed è più costoso a causa delle molte componenti necessarie.

Questo tipo di impianto si presta molto bene alla modifica per l'inserimento del fresato, tenendo sempre in considerazione che quest'ultimo non deve attraversare la fiamma del bruciatore del cilindro essiccatore altrimenti si avrebbero problemi di cracking del bitume.

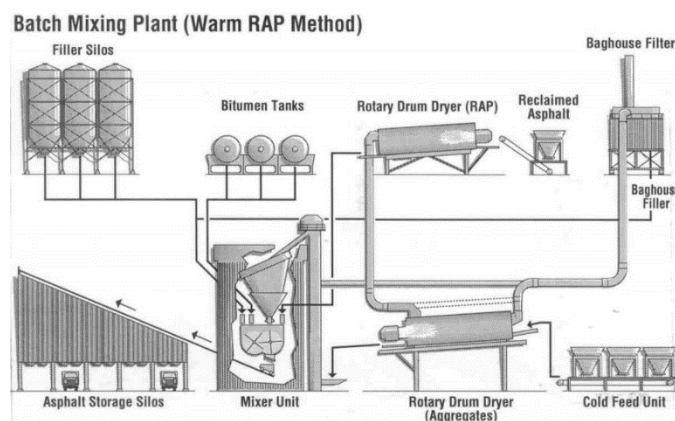


Figura 2.8 - Impianto discontinuo di riciclaggio a caldo con essiccatore dedicato per il fresato

Il RAP può essere introdotto nelle miscele a caldo senza alcuna prescrizione fino ad un dosaggio del 10% per lo strato di usura e del 20% per strati di binder e base; nel caso di percentuali superiori si adotteranno studi più accurati in termini di granulometria del fresato e contenuto e natura del bitume invecchiato [4].

- Impianto continuo

In questa tipologia di impianto, essiccazione e miscelazione avvengono contemporaneamente nel tamburo essiccatore, che quindi avrà dimensioni maggiori rispetto all'impianto discontinuo. Non sono presenti torre di miscelazione e vaglio, per cui i costi dell'impianto sono minori e la produttività è maggiore; tuttavia, il processo di miscelazione è meno controllato e quindi la qualità del prodotto finito è inferiore rispetto all'impianto discontinuo.

In questa configurazione si riesce a recuperare fino al 70% di fresato e, come prima, quest'ultimo non deve andare a contatto con la fiamma del bruciatore per evitare fenomeni

di ossidazione del bitume. Esistono vari sistemi e il più utilizzato è quello a doppia alimentazione, in cui il fresato viene introdotto a metà cilindro e quindi il suo riscaldamento avviene solo per contatto con gli aggregati vergini già scaldati.

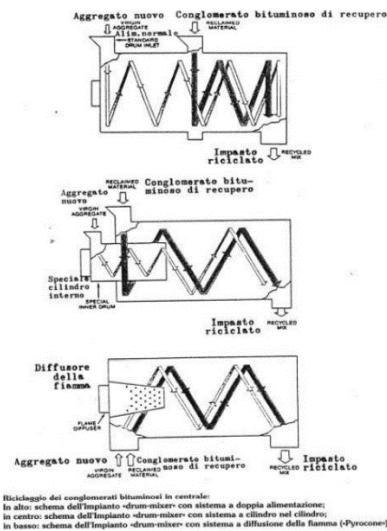


Figura 2.9 - Diverse modalità di introduzione del RAP nel cilindro essiccatore

2.5.2 In situ

Questo tipo di procedura veniva molto utilizzata in passato per la costruzione degli strati di base. Se da un punto di vista prestazionale è vero che i risultati ottenuti sono elevati è altresì vero che dal punto di vista ambientale si tratta di una tecnica molto inquinante, a causa delle elevate emissioni prodotte.

La profondità di azione è di circa 5 – 6 cm, quindi la tecnica si rivela inefficiente nelle pavimentazioni con ammaloramenti negli strati più profondi.

Il riciclaggio a caldo viene realizzato con dei treni di riciclaggio in cui ci sono macchine che scaldano e scarificano la pavimentazione e poi altre che aggiungono materiale vergine per la correzione granulometrica, additivi rigeneranti per il bitume invecchiato e bitume nuovo. Il materiale viene poi steso e compattato.

Come detto precedentemente però, l'eccessivo inquinamento prodotto, unito anche alla complessità di esecuzione di una accurata correzione granulometrica in sito, fanno sì che questa tecnica non venga più utilizzata.

2.6 Riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo consiste nel confezionare una miscela di conglomerato bituminoso sfruttando quanto più possibile RAP, cioè fresato derivante dalla demolizione di una pavimentazione preesistente oramai invecchiata; viene inserito a temperatura ambiente e non necessita di un riscaldamento durante le fasi realizzative. Il RAP per essere correttamente impiegato deve essere sottoposto ad un idoneo processo di lavorazione (frantumazione, selezione e vagliatura).

Il riciclaggio a freddo delle pavimentazioni bituminose può avvenire direttamente in situ oppure in impianto.

La produzione di conglomerati bituminosi riciclati a freddo è sempre più una valida alternativa ai tradizionali conglomerati a caldo in quanto non comporta particolari difficoltà in fase realizzativa ma al contempo offre notevoli vantaggi ambientali, legati al non riscaldamento nelle fasi produttive. I vantaggi sono di natura ambientale, economica ed energetica, infatti notiamo una riduzione delle quantità di materiali conferiti in discarica, un minor consumo di aggregati di primo utilizzo, una riduzione dei viaggi degli automezzi, con conseguente diminuzione delle emissioni atmosferiche inquinanti [55].

Nel riciclaggio a freddo, in inglese CRM (Cold Recycling Mixtures), le miscele sono composte da [5]:

- Materiale di recupero (RAP), proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- Legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o schiuma di bitume;
- Filler (additivi);
- Acqua di aggiunta, per un miglioramento della lavorabilità;
- Aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero.

Va ovviamente posta particolare attenzione alla determinazione delle caratteristiche del fresato, che permetterà conseguentemente di regolare la quantità e qualità degli altri componenti della miscela, con lo scopo di ottenere il miglior prodotto finale possibile.

2.6.1 In impianto

Il processo di riciclaggio a freddo può essere realizzato per mezzo di impianti mobili, detti “semoventi”, facilmente installabili in un'area interna o prossima al cantiere, riducendo costi e consumi di trasporto del fresato. In questa tipologia di impianto è possibile effettuare un accurato dosaggio delle varie componenti, che possono essere comunque variate a seconda della miscela, e ha una produttività di 100-150 tonn/ora. Si possono avere due tipologie di funzionamento dell'impianto: discontinuo e continuo. Nel primo caso, inerti e legante vengono pesati e solo dopo aver raggiunto un determinato quantitativo vengono inviati al ciclo produttivo. Nel secondo caso invece l'immissione dei materiali è continua, ciò rende il processo produttivo più veloce ma meno preciso in termini di dosaggio.



Figura 2.10 – Impianto mobile per la produzione di conglomerato a freddo

Il riciclaggio a freddo può essere realizzato anche per mezzo di impianti per misti cementati adeguatamente predisposti. La produzione può avvenire anche per mezzo di impianti fissi, i quali risultano molto più semplici di quelli tradizionali per la produzione a caldo dei conglomerati bituminosi.

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- Un sistema di frantumazione e riselezionatura del fresato;
- Due o più predosatori per il fresato e per gli aggregati di integrazione;

- Un silos per il cemento con abbinata una coclea a velocità variabile;
- Un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa e/o bitume per schiumatura;
- Un serbatoio per l'acqua con misuratore di portata;
- Un mescolatore di tipo continuo a due alberi;
- Rampe di spruzzatura per l'acqua con misuratore di portata;
- Rampa per l'emulsione;
- Attrezzature e strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire un costante controllo di processo;
- Un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro, o apparecchiatura di scarico dal mescolatore.

Il conglomerato fresato in ingresso all'impianto viene frantumato e rifezionato. In base alla curva granulometrica si stabilisce l'apporto di aggregati vergini per correggere la curva, se necessario. RAP e aggregati vergini vengono trasportati, per mezzo di nastri, al mescolatore in cui avviene la miscelazione.

Durante la miscelazione viene aggiunto:

- Il legante, che può essere emulsione bituminosa o bitume schiumato con dosaggio tra 3 e 6%;
- L'acqua di aggiunta, per migliorare la lavorabilità;
- Filler
- Additivi calcarei o silicei. Il più usato è il cemento, con dosaggio 1-3%, la sua funzione è quella di migliorare la resistenza del conglomerato e di favorire la rottura dell'emulsione.

Una volta completata la miscelazione, il conglomerato bituminoso ottenuto viene direttamente caricato sui mezzi e portato in cantiere oppure può essere conservato nel silo di stoccaggio del conglomerato bituminoso riciclato a freddo per conservarlo prima di essere trasportato in situ, se presente nell'impianto.

Una volta confezionato e trasportato in cantiere, il conglomerato bituminoso viene steso con vibrofinitrice come un tradizionale conglomerato bituminoso a caldo e costipato con rulli compattatori.

Grazie al controllo del dosaggio dei vari materiali costituenti, in impianto si ottengono maggiori livelli qualitativi della miscela, garantendo così una maggiore stabilità di produzione e delle prestazioni meccaniche del prodotto finale.



Figura 2.11 – Impianto fisso per la produzione di conglomerato a freddo

2.6.2 In situ

La rigenerazione avviene tramite il cosiddetto "treno di riciclaggio" composto da specifici macchinari che consentono la fresatura, la fresa opera la cosiddetta fresatura "a freddo", della vecchia pavimentazione e la miscelazione con il legante bituminoso, il cemento ed eventuali aggregati vergini di integrazione per correzioni granulometriche. Lo spessore dello strato riciclato in situ, generalmente, è maggiore di 15 cm: questo limite geometrico è determinato dalla capacità della camera di miscelazione della riciclatrice.

2.6.2.1 Vantaggi e Svantaggi

È stato già accennato come il riciclaggio a freddo in situ presenti numerosi vantaggi, in particolare si hanno:

- Vantaggi ambientali: in quanto è possibile recuperare il 100% della pavimentazione preesistente. Ciò permette di evitare la destinazione di aree a uso discarica, la riduzione di consumo di aggregati vergini e conseguentemente la riduzione delle aperture di nuove cave. Inoltre, si avrà anche la riduzione dell'inquinamento dovuto alle emissioni per il trasporto del RAP e del riscaldamento del bitume.
- Vantaggi prestazionali: le modalità di realizzazione e controllo delle fasi di miscelazione rendono lo strato in riciclato a freddo più prestante rispetto al misto cementato [11], materiale con cui viene generalmente costruito uno strato di base.
- Tempi brevi di costruzione: in sito il riciclaggio a freddo viene effettuato tramite dei *treni di riciclaggio*, che hanno una produttività elevata, grazie alla possibilità di miscelare in continuo, e quindi il disagio arrecato alla circolazione è ridotto.
- Sicurezza della circolazione: il treno si posiziona lungo una sola corsia, per cui le fasi esecutive risultano più agevoli e sicure.

Le modalità di riciclaggio a freddo più utilizzate sono:

- Con bitume schiumato e cemento
- Con emulsione bituminosa e cemento

2.6.2.1.1 Bitume schiumato e cemento

Il bitume viene scaldato fino a 160-180°C e viene messo a contatto in una camera di espansione con acqua a temperatura ambiente (dosaggio 2%). Dal contatto acqua bitume si genera vapore che comporta un aumento del volume del legante e la formazione di una schiuma costituita da bolle di vapore coperte da una sottile pellicola di bitume. Questa soluzione porta ad un aumento di volume tra 15 e 20 volte a seconda della tipologia di bitume e della quantità d'acqua utilizzati [12]. L'aumento di volume comporta un aumento di superficie specifica che favorisce il legame del bitume con la frazione fina degli aggregati, si crea una malta che si va a legare con gli aggregati più grandi. Il processo appena descritto migliora la lavorabilità a contatto con gli inerti [1].

Il bitume schiumato è caratterizzato da due parametri: il *rapporto di espansione* (expansion ratio), ovvero il rapporto tra il volume massimo del bitume allo stato espanso e quello allo stato originario, e il tempo di *semitrasformazione* (*half life*), ovvero il tempo che occorre affinché la schiuma si depositi, fino a raggiungere la metà del volume massimo ottenuto [13].

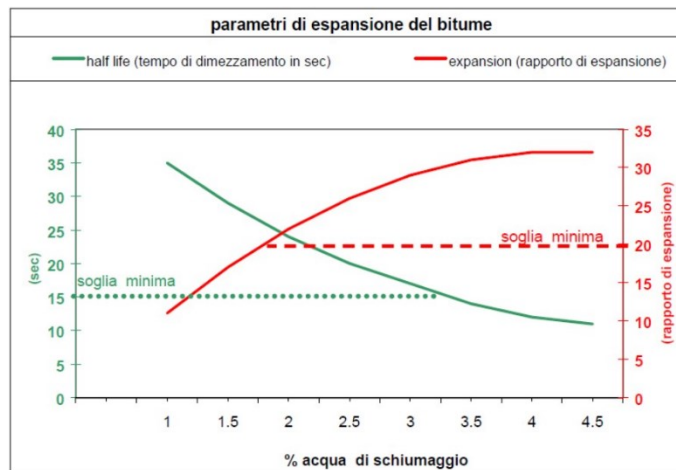


Figura 2.12 - Rapporto di espansione e tempo di semitrasformazione

I parametri dipendono principalmente dalla quantità d'acqua e dal tipo di bitume: in particolare i bitumi più morbidi e viscosi sono quelli che riescono a produrre più schiuma, mentre quelli più duri si utilizzano solo a temperature elevate [12].

Il bitume espanso appena prodotto viene aggiunto, con dosaggio 3-5% rispetto alla massa degli inerti, al materiale fresato, cemento e acqua e si ha un processo di miscelazione molto energico e rapido. La miscelazione avviene in questa modalità per prevenire il decadimento della schiuma di bitume. Successivamente la miscela viene immediatamente posta in opera e compattata.

I vantaggi nell'utilizzo del bitume schiumato sono [10]:

- Minimo inquinamento atmosferico;
- Possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;
- Ridotto contenuto ottimale di bitume;
- Minor invecchiamento a breve termine del legante, grazie alle minori temperature degli inerti con cui viene a contatto;
- Minori problemi di compattazione e di umidità con la schiuma;
- Posa in opera anche con condizioni climatiche non ottimali.

Di contro, gli svantaggi possono essere:

- Scarsa esperienza sul confezionamento della miscela;

- La presenza di anti-schiumanti in fase di produzione del bitume comporta problematiche in fase di produzione della schiuma, pertanto è possibile utilizzare solo determinati tipi di bitumi.
- Necessità di disporre di bitume caldo, a circa 180°.

2.6.2.1.2 Emulsione bituminosa e cemento

In questo caso al fresato stradale viene aggiunto prima il cemento e poi una miscela di bitume, acqua ed emulsionanti per garantire coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato.

L'emulsione bituminosa cationica a lenta rottura (sovrastabilizzata), emulsione comunemente utilizzata per il riciclaggio a freddo, generalmente è costituita dal 60% di bitume e dal 40% di acqua, ed è presente nel conglomerato bituminoso con una percentuale variabile dal 3% al 6% circa rispetto alla massa degli aggregati. Inoltre, l'emulsione bituminosa deve essere in grado di rigenerare il bitume ossidato contenuto nel conglomerato bituminoso di recupero e di modificare la viscosità del bitume invecchiato.

I vantaggi sono [7]:

- Facilità di reperimento e applicazione delle emulsioni;
- Facilità di modifica delle emulsioni con additivi (i.e. lattice) per migliorare le prestazioni del legante;
- Utilizzo dell'emulsione a temperatura ambiente, riducendo i rischi per gli addetti e consentendo una maggiore flessibilità nella gestione dei tempi di attesa prima della miscelazione;
- L'emulsione tende a rivestire con un velo continuo i granuli dell'aggregato, mentre il bitume schiumato si disperde in forma di piccoli frammenti, generando legami puntuali.

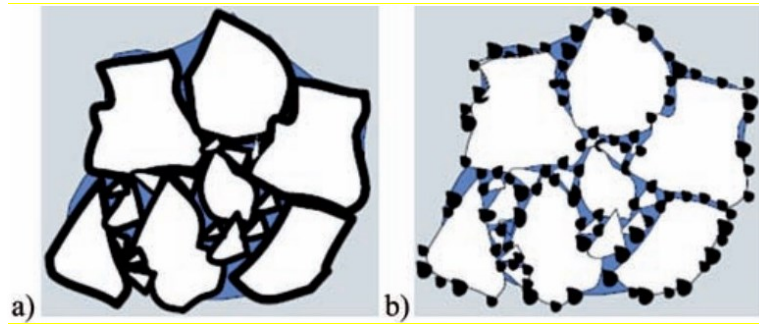


Figura 2.13 - Ricopertura degli aggregati nel caso di impiego di emulsione bituminosa a) e di bitume schiumato b)

- Possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;
- Ridotte fessurazioni (lo strato è molto flessibile e resistente a fatica);
- Conglomerato resistente all'aggressione dell'umidità;

Gli svantaggi invece sono:

- Trattamento più costoso rispetto all'utilizzo di bitume schiumato e cemento;
- L'emulsione deve avere un adeguato tempo di rottura per essere compatibile con il materiale riciclato, quindi non tutte sono idonee;
- Trattamento problematico se in sito è presente un tasso elevato di umidità, con possibilità di rigonfiamento dello strato riciclato;
- Temperatura di stesa $>10^{\circ}\text{C}$;
- Necessità di una bassa umidità atmosferica.

2.6.2.2 Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive

Si definisce treno di riciclaggio un insieme di macchine operatrici semoventi, disposte generalmente in fila indiana, che possono differenziarsi a seconda del tipo di intervento. Ad esempio, un treno di riciclaggio con emulsione bituminosa è composto da:

- Fresatrice-riciclatrice
- Mescolatrice (cisterna per l'acqua, dosatore e mescolatore, eventuali silos del cemento e spandimento)
- Autocisterna contenete emulsione bituminosa
- Livellatrice
- Rullo vibrante per la compattazione



Figura 2.14 – Treno di riciclaggio: mezzi e fasi

La cisterna dell'acqua non è sempre presente, in ogni caso è necessaria quando si ha a che fare con bitume schiumato, cemento/calce oppure quando si richiede l'immissione di acqua di aggiunta.

Il primo macchinario è la fresa, il cui obiettivo è quello di demolire la pavimentazione fino alla profondità desiderata. Il fresato viene accumulato sotto forma di cordolo continuo lungo l'asse stradale e verrà raccolto e caricato nella macchina mescolatrice che segue, impastato con emulsione o schiuma di bitume, acqua e altri additivi e viene poi steso e compattato.

Ad oggi c'è stata un'evoluzione nell'ambito delle macchine operatrici: il vecchio sistema *multi train*, composto da fresatrice e mescolatrice distinte, è stato soppiantato dal sistema *single unit* composto da una riciclatrice specializzata che esegue il compito della fresa e della mescolatrice contemporaneamente.



Figura 2.15 - Riciclatrice specializzata a freddo

Le riciclatrici specializzate oggi presenti sul mercato, sono in grado di intervenire sulla pavimentazione fino a 30 cm di spessore effettuando un'unica passata. Ciò le rende macchinari molto efficienti, a discapito però delle dimensioni che risultano elevate. La parte più importante è il tamburo: si tratta di un cilindro rotante dotato di utensili da taglio, comunemente definiti denti, in acciaio temprato che ruotando asportano la pavimentazione stradale ammalorata.



Figura 2.16 - Tamburo di fresatura

In questo caso il treno di riciclaggio viene riconfigurato come segue:

- Spandimento a dosaggio computerizzato
- Autocisterna contenente acqua
- Autocisterna contenente emulsione bituminosa o bitume caldo
- Riciclatrice
- Rullo compattatore con massa superiore a 20 t
- Livellatrice
- Rullo gommato con massa superiore a 28 t



Figura 2.17 - Treno di riciclaggio a freddo con riciclatrice

Ogni treno di riciclaggio può essere diverso, a seconda dell'applicazione e del tipo di stabilizzante impiegato; tuttavia un aspetto comune è rappresentato dal fatto che la riciclatrice funga da locomotiva e spinga o tiri l'attrezzatura ad essa collegata attraverso delle barre di spinta o di traino.

Durante la fresatura, l'acqua contenuta nella cisterna collegata alla riciclatrice viene dosata con precisione tramite un impianto di iniezione controllato da un microprocessore, spruzzata all'interno della camera di fresatura e attentamente miscelata al materiale di recupero, affinché esso raggiunga il grado di umidità ottimale per il successivo costipamento. Le sostanze stabilizzanti fluide, come l'impasto di acqua e cemento, possono anch'essi essere introdotti nella camera di miscelazione, sfruttando la medesima tecnica; inoltre il bitume schiumato può essere iniettato nella stessa camera, mediante un'apposita barra spruzzatrice.

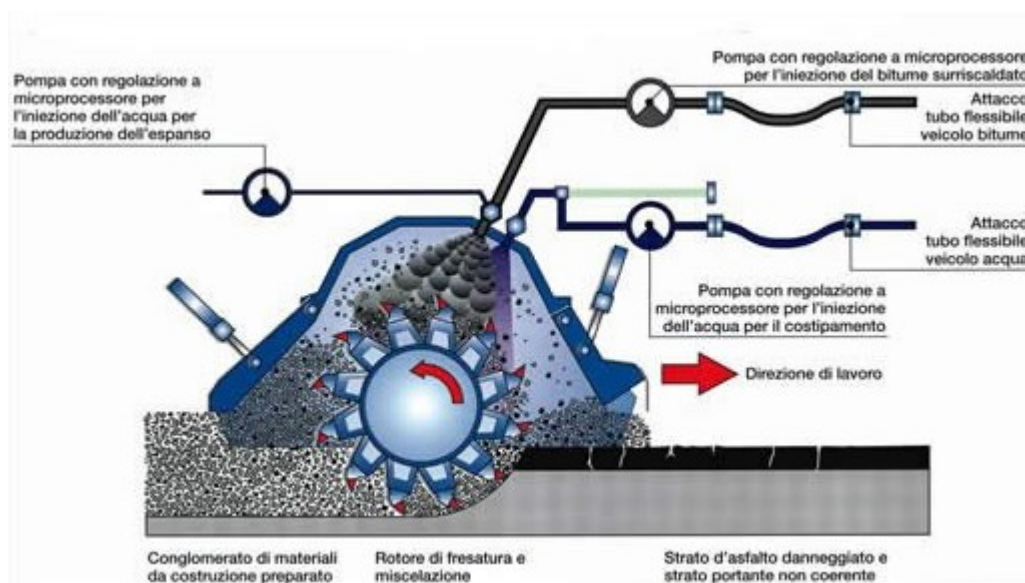


Figura 2.18 - Camera di miscelazione con bitume schiumato

Nel caso di riciclaggio con emulsione bituminosa il cemento e l'acqua vengono miscelati insieme in quantità prestabilite, e la miscela così ottenuta viene trasferita mediante un tubo flessibile e iniettata contemporaneamente all'emulsione nella camera di miscelazione della riciclatrice. In alternativa il cemento può essere aggiunto, con dosaggio 2-4% rispetto alla

massa della miscela, spargendolo sopra la superficie stradale prima del passaggio della riciclatrice. L'emulsione è stoccata in un'autobotte posizionata nel treno di riciclaggio e viene aggiunta in camera di miscelazione.

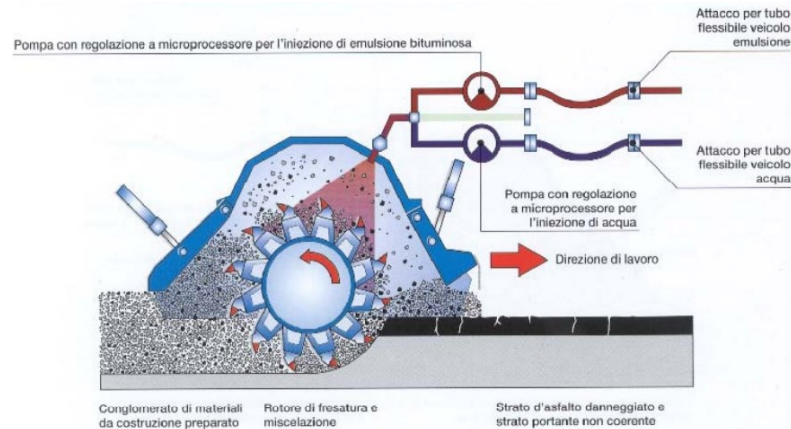


Figura 2.19 - Camera di miscelazione con emulsione bituminosa

Il materiale uscente dalla riciclatrice è precompattato da un rullo vibrante monotamburo al fine di ottenere un grado di addensamento uniforme e poi profilato da una motolivellatrice (Grader). Successivamente la miscela è costipata tramite un rullo vibrante tandem di peso >18 t con controllo di frequenza e di ampiezza di vibrazione e da un rullo gommato di carico statico >25 t.

2.7 Riciclaggio a freddo dello strato di base

Lo strato che assorbe più di tutti le azioni flessionali generate dai carichi è il cosiddetto strato di base. Le sue dimensioni sono molto variabili in base all'entità del traffico pesante. Questo strato può essere in misto bitumato o cementato. Più precisamente viene usato il misto bitumato per le pavimentazioni flessibili, mentre il misto cementato per quelle semi-rigide. Le caratteristiche meccaniche sono inferiori, per questo motivo anche i costi di questo materiale sono più bassi. In una stratificazione stradale il costo diminuisce dall'alto verso il basso [56].

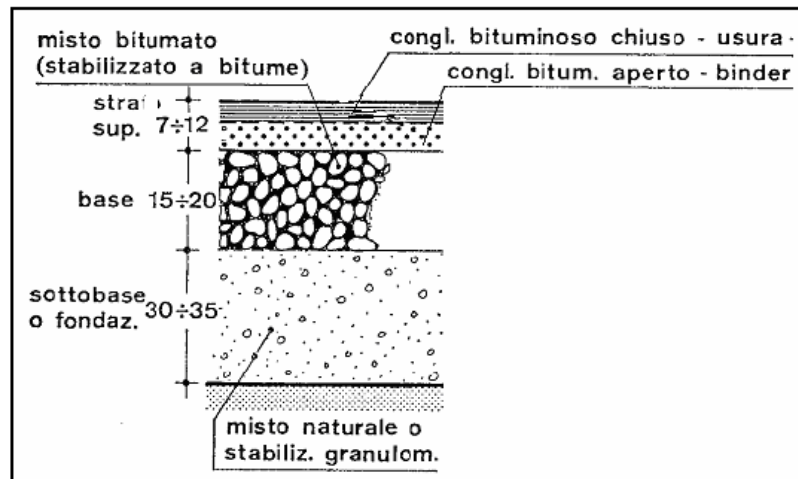


Figura 2.20 – Esempio di stratigrafia

Come detto in precedenza, nella realizzazione dei vari strati della pavimentazione stradale si può decidere di procedere in 2 modi principali: realizzare lo strato ex novo, quindi con materiali totalmente vergini; oppure si può realizzare con materiali di riciclo.

La base riciclata a freddo è costituita dal fresato di conglomerato bituminoso proveniente dalla pavimentazione asportata per almeno il 70%, da eventuali inerti vergini (da non utilizzare per più del 30%) per la correzione granulometrica, da cemento e da emulsione bituminosa di bitume modificato. Questo potrà essere realizzato in un impianto fisso o mobile, come descritto nei capitoli precedenti.

Il conglomerato bituminoso fresato può provenire dalla sua primitiva posizione o da cumuli preesistenti. Gli spessori compattati non potranno superare i 35 cm e dovranno essere posati su sottofondo di caratteristiche adeguate.

Di seguito il dettaglio dei componenti dello strato di base [57]:

- Legante, che dovrà essere composto dal bitume del conglomerato riciclato integrato con emulsione bituminosa. L'emulsione dovrà essere un'emulsione cationica a rottura lenta sovrastabilizzata secondo quanto previsto dalla UNI EN 13808:2013. Deve resistere alla rottura dopo l'impasto con cemento.
- Fresato (UNI EN 13108-8): Per fresato intendiamo il conglomerato presente nella demolizione tramite fresatrici. La percentuale di conglomerato riciclato (che dovrà essere almeno pari al 70%) dovrà essere dichiarata alla Direzione Lavori prima

dell'inizio dell'intervento. Questo può essere "fresato" cioè derivante direttamente dalla fresatura in cantiere, o "granulato d'asfalto" cioè fresato recuperato e trattato proveniente da impianti esterni (Decreto End of Waste).

- Inerti di integrazione: Se la composizione del fresato non dovesse consentire di realizzare la curva di progetto la miscela dovrà essere integrata con aggregati grossi, nuovi e fini ricavati dalla lavorazione di rocce, aggregati naturali tondeggianti, aggregati naturali a spigoli vivi.
- Cemento: È un legante che favorisce il processo di disidratazione per regolare i tempi di rottura dell'emulsione.
- Acqua: Dev'essere utilizzata acqua priva di sostanze organiche o altre sostanze nocive.

Da questo se ne deduce che la realizzazione dello strato di base in sito risulta conveniente per l'ambiente, poiché limita gli spostamenti da e verso gli impianti e verso la cava, il risparmio di materiale che altrimenti verrebbe sottoposto a smaltimento [S8].

Di seguito si elencano alcuni vantaggi nell'impiego dell'emulsione bituminosa per la realizzazione del conglomerato bituminoso riciclato a freddo [S9]:

- L'emulsione riveste in maniera continua i granuli dell'aggregato.
- L'emulsione può essere integrata con additivi quali ad esempio il lattice di gomma o può essere prodotta con bitumi modificati, in modo da ottenere una pavimentazione con prestazioni superiori.
- Le emulsioni che costituiscono lo strato di base possono essere realizzate a temperatura ambiente, evitando rischi per gli addetti e consentendo una maggiore flessibilità nella gestione dei tempi di attesa prima della miscelazione.



Figura 2.21 – Posa in opera di uno strato di base

2.8 Requisiti di capitolato ANAS

In questo capitolo viene illustrato quali siano le prescrizioni dell'ente ANAS riguardo le varie componenti della miscela di conglomerato bituminoso riciclato a freddo.

2.8.1 Materiali inerti

La tecnologia del riciclaggio con emulsione permette di riciclare fresati di pavimentazioni ammalorate per la formazione di strati di base e binder, miscelando con emulsione bituminosa modificata, cemento e acqua il fresato (in sito o in impianto idoneo) stendendo (con finitrice) e compattando il pacchetto risultante.

Per la realizzazione della miscela ai fini del raggiungimento delle necessarie caratteristiche tecniche (granulometria, resistenza, portanza) è consentita l'integrazione con aggregati frantumati di cava (frantumazione 100%) nella percentuale massima del 30%.

2.8.2 Leganti e additivi

Per legante si dovrà impiegare emulsione bituminosa acida modificata (con SBS e/o lattice), in percentuali comprese tra 3,0 e 4,5% in peso sugli aggregati, secondo le caratteristiche indicate dalla seguente tabella:

TABELLA 6.E - EMULSIONI BITUMINOSE MODIFICATE		
caratteristiche	unità di misura	valori
contenuto d'acqua	% in peso	≤ 40
contenuto di bitume	% in peso	≥ 60
grado di acidità (pH)		2-4
sedimentazione a 7 gg	%	< 10
caratteristiche del bitume estratto		
penetrazione a 25°C	dmm	50 - 70
punto di rammollimento	° C	55 - 75
punto di rottura Fraass	° C	≤ -10
Ritorno elastico	%	≥ 55

Tabella 2.2 - Requisiti emulsioni bituminose modificate per riciclaggio a freddo

Il cemento andrà dosato in percentuali tra 0,7 e 2% in peso sugli aggregati.

In aggiunta all'emulsione dovrà essere impiegato cemento 325 (Portland, d'altoforno o pozzolanico).

L'acqua di aggiunta dovrà essere pura priva di sostanze organiche.

2.8.3 Miscela

La miscela di materiale da riciclare ed eventuali inerti freschi sarà tale da avere una composizione granulometrica contenuta nel fuso prescritto.

La granulometria è intesa del materiale post estrazione del bitume.

Apertura Setacci (mm)	Fuso	
	31,5	100
20	68	92
14	50	75
8	36	60
4	25	48
2	18	38
0,25	8	20
0,125	5	14
0,063	4	9

Tabella 2.3 - Fuso di prescrizione

2.8.4 Requisiti di accettazione

Le miscele devono avere massime caratteristiche di resistenza a fatica, all'ormaiamento, ai fattori climatici e in generale ad azioni esterne.

Le miscele devono essere verificate mediante pressa giratoria (UNI EN 12697-31) con i seguenti parametri di prova:

- 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 ± 3 kPa
- Diametro provino: 150 mm
- n° giri: 100

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

Per le resistenze si dovranno realizzare provini con pressa giratoria con n° giri 180 con le seguenti caratteristiche:

	3 gg	Dimensioni provini
ITS 25°C (GPa x 10 ⁻³)	0,32-0,55	Diametro 150mm – altezza 100-130 mm
Compressione semplice 25 °C (GPa x 10 ⁻³)	1,2 – 2,5	Diametro 150mm – altezza 160-200 mm

Tabella 2.4 - Requisiti resistenze

I provini vanno maturati a 40 °C e termostati a 25 °C per 4 ore prima del test di rottura.

2.8.4.1 Studio preliminare

I parametri sopra descritti potranno essere ricercati mediante l'effettuazione di uno studio finalizzato alla determinazione delle percentuali ottimali dei leganti (cemento ed emulsione) e dell'acqua di compattazione oltreché allo stabilire l'eventuale aggiunta di aggregati di integrazione. A tal fine si dovranno realizzare provini con pressa giratoria, secondo il seguente schema.

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 2.5 - Contenuto ottimale di acqua con 2% di cemento

Ogni provino deve essere pesato prima e dopo la compattazione al fine di determinare la percentuale di (eventuale) acqua espulsa. I provini così ottenuti devono essere essiccati fino a peso costante in stufa a 40°C e sottoposti a prova per la valutazione della massa volumica (UNI EN 12697-6/procedura D). Il contenuto ottimo di acqua sarà quello che permette di raggiungere il valore più elevato di massa volumica della miscela (secca) e un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione minore dello 0,5%. Secondo la stessa procedura di compattazione e con il contenuto di acqua ottimo, devono essere confezionati provini con differenti quantità (percentuali riferite al peso degli inerti) di cemento ed emulsione bituminosa (di bitume modificato con polimeri), come indicato nella Tabella 2.6.

Acqua [%]	Contenuto ottimo								
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 2.6 - Confezionamento provini in base alle % di cemento e di emulsione bituminosa

Nel contenuto ottimo di acqua della miscela bisogna considerare anche l'acqua apportata dall'emulsione.

Sui provini confezionati con le miscele che soddisfano i requisiti di resistenza a trazione indiretta, maturati per 72 ore a 40 °C, si deve determinare il modulo di rigidità in configurazione di trazione indiretta (spostamento orizzontale imposto $5 \pm 0.2 \mu\text{m}$) secondo la Norma UNI EN 12697/26. La miscela ottima di progetto sarà quella che fornisce il modulo di rigidità 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. Sulla miscela ottima si deve determinare la densità geometrica a 100 giri di pressa giratoria che costituisce il riferimento per il controllo della densità in sito.

Capitolo 3 - Materiali

In questo capitolo vengono trattati i materiali utilizzati nel confezionamento delle miscele per la sperimentazione, in particolare sono stati utilizzati:

- RAP in tre diversi frazionamenti: grosso, medio e fino;
- filler;
- cemento Portland;
- acqua;
- emulsione bituminosa modificata SBS;
- fibre polimeriche.

3.1 RAP

Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavements), comunemente chiamato fresato, è il materiale di risulta proveniente dalla fresatura degli strati legati delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Esso è composto per il 93-97% in peso da aggregati lapidei di varia granulometria e per il resto da bitume invecchiato.

In realtà le “Norme Tecniche d’Appalto Prestazionali” (Autostrade SPA, 2004) distinguono i termini RAP e fresato: col primo si intende il materiale risultante dalla dismissione con qualsiasi mezzo e successiva frantumazione degli strati bituminosi delle pavimentazioni degradate; col secondo invece si intende il materiale prodotto dalla demolizione con macchine fresatrici a tamburo, preferibilmente a freddo.

Il fresato utilizzato proviene dalla dismissione di una pavimentazione sita sulla SS76 (Ancona Perugia) ed è stato caratterizzato attraverso la prova di analisi granulometrica descritta dalla normativa UNI EN 933-1.

	PERUGIA 1	PERUGIA 2	MEDIA
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0
20	97,4	95,7	96,6
16	94,0	91,6	92,8
10	84,8	82,5	83,7
8	74,6	74,4	74,5
4	51,2	52,5	51,9
2	33,4	34,7	34,1
1	20,2	20,6	20,4
0,5	11,9	12,3	12,1
0,25	7,5	7,8	7,7
0,125	4,0	4,1	4,1
0,063	2,7	2,7	2,7
FONDO	0	0	0

Tabella 3.1 - Analisi granulometrica dei 2 campioni di RAP

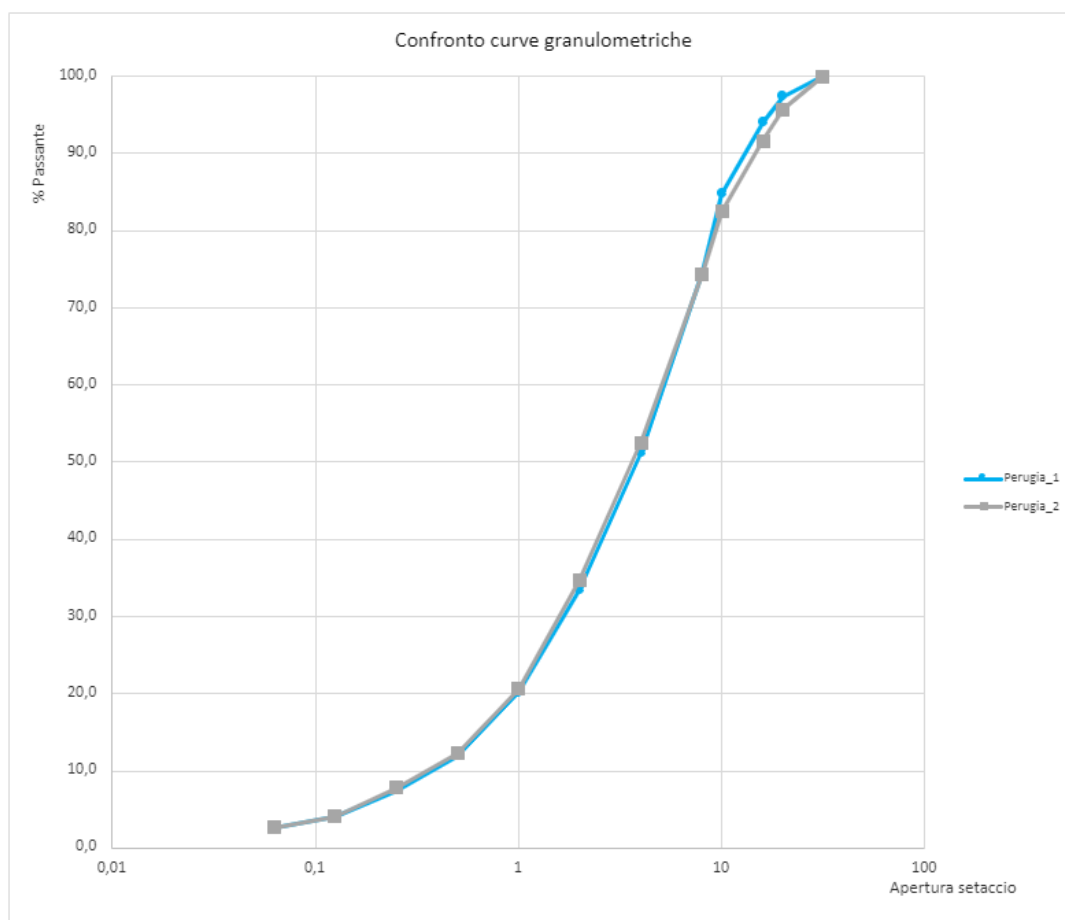


Figura 3.1 - Curva granulometrica dei 2 campioni di RAP



Figura 3.2 – RAP suddiviso nelle 3 frazioni utilizzato nella sperimentazione: da sx fino, medio, grosso

Come anticipato ad inizio capitolo, durante la sperimentazione si è deciso di utilizzare il fresato suddividendolo in tre frazioni granulometriche: fino 0-1 mm, medio 1-8 mm, grosso 8-20 mm.

3.2 Filler calcareo

Il filler è l'aggregato ottenuto dalla frantumazione di roccia calcarea ed è solitamente rappresentato da carbonato di calcio, calce, cemento (non del tipo a presa rapida) o ceneri volanti. È caratterizzato da dimensioni finissime e la sua funzione è quella di integrare la curva granulometrica. Secondo la norma CNR 139 si parla di filler per dimensioni minori di 0,075 mm mentre per la normativa UNI EN 933-1 la dimensione massima è di 0,063 mm.



Figura 3.3 - Filler calcareo

Campione:	Filler
d [mm]	% passante
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 3.2 - Analisi granulometrica filler

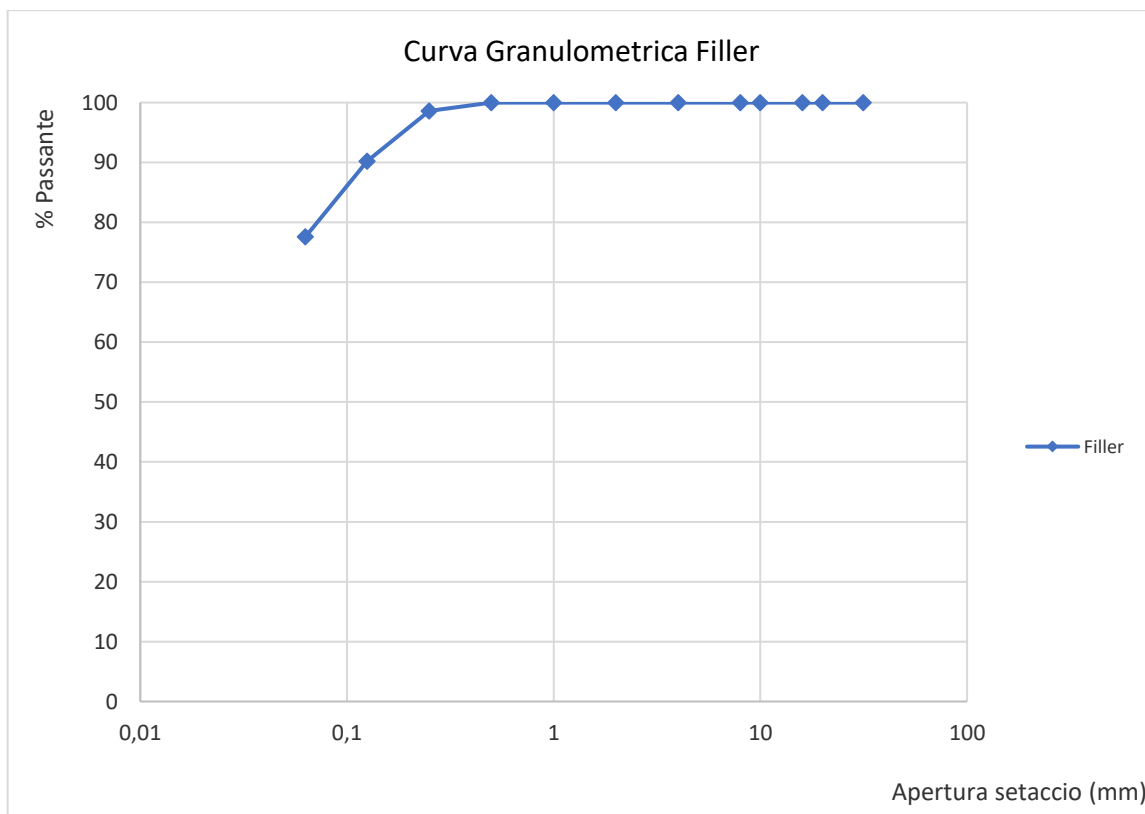


Figura 3.4 - Curva granulometrica filler

Ai fini di questo lavoro, la scelta è ricaduta su un filler calcareo poiché chimicamente inerte, mentre quello in cemento reagisce chimicamente e fisicamente e quindi andrebbe a modificare sensibilmente le caratteristiche volumetriche e meccaniche dell'impasto.

È necessario prestare attenzione riguardo l'utilizzo del filler per i seguenti motivi:

- un eccesso nel dosaggio di filler incrementa in maniera sensibile la superficie specifica offerta dagli aggregati e, quindi, aumenta la velocità di rottura dell'emulsione;
- la presenza eccessiva del filler realizza con l'emulsione una pasta viscosa, mentre gli aggregati di dimensioni maggiori potrebbero non essere completamente rivestiti dal legante organico.

Anche il cemento contribuisce al processo di amalgama con l'emulsione, analogamente a quanto avviene per il filler minerale.

Nei paesi caldi, la presenza del filler contribuisce ad evitare il rifluire del bitume (soprattutto negli strati più alti del pacchetto stradale): quello che si rivela un difetto in fase di lavorazione, in fase di messa in opera diventa, invece, un pregio [17].

3.3 Emulsioni Bituminose

Il bitume presente nel RAP ha subito un invecchiamento chimico e fisico che ha comportato un aumento della viscosità e quindi una maggior fragilità: infatti dalle prove di laboratorio si è visto come, a causa dell'invecchiamento, ci sia una diminuzione dell'indice di penetrazione e un aumento della temperatura palla anello [16]. Questo bitume già presente nell'aggregato non è sufficiente però per garantire le giuste caratteristiche prestazionali alla miscela finale, perciò può essere aggiunta l'emulsione bituminosa. L'emulsione bituminosa è una sostanza composta da due liquidi: uno con funzione disperdente, che è l'acqua, e uno disperso sotto forma di goccioline, che è il bitume [14].

A temperatura ambiente il bitume si presenta come molto viscoso e, a causa di ciò, la lavorabilità è molto bassa. Si può ovviare a questo problema riscaldando il bitume, con relativi costi in termini economici e ambientali, oppure utilizzando l'emulsione bituminosa, che riesce a garantire una adeguata lavorabilità in fase di miscelazione anche a temperatura ambiente.

Nel primo caso è il riscaldamento che dona lavorabilità al materiale, mentre invece nel secondo caso è l'acqua.

Generalmente un'emulsione bituminosa è composta dal 60% in volume di bitume e dal 40% in volume di acqua, tuttavia possono essere presenti anche altri additivi detti "emulsionanti", che impediscono la separazione tra le due fasi, ovvero tra acqua e bitume [1].

Una volta avvenuta la miscelazione, l'acqua presente nell'emulsione viene eliminata e quindi le goccioline di bitume si legano le une con le altre formando un velo che riveste gli aggregati. Questo processo viene chiamato "rottura". Durante questa fase l'emulsione aumenta la sua viscosità e ciò complica la lavorabilità della miscela e il successivo costipamento. Proprio per questo motivo l'emulsione utilizzata deve essere adeguata ai materiali e la rottura deve avvenire dopo o durante la fase di compattazione.

La rottura dell'emulsione bituminosa avviene in tre fasi [1]:

- Decantazione: le goccioline di bitume si sedimentano
- Flocculazione: le particelle di bitume si avvicinano
- Coagulazione: le particelle di bitume si legano tra loro

La velocità di rottura dipende da [14]:

- Temperatura ambientale
- Temperatura dell'emulsione
- Dimensione delle particelle di bitume disperse
- Dimensione e natura degli inerti
- Modalità di miscelazione e compattazione

E infatti si distinguono cinque categorie diverse di emulsioni in base alla velocità di rottura:

- Rottura super rapida (RR)
- Rottura rapida (ER)
- Rottura media (EM)
- Rottura lenta (EL)
- Rottura sovrastabilizzata (LL)

Il fenomeno della rottura generalmente avviene per perdita di acqua a causa di evaporazione o assorbimento da parte degli aggregati, ma ci sono anche altri fattori che influenzano questo processo come: la coagulazione chimica tra emulsione e aggregato; i processi di miscelazione e costipamento; la composizione chimica dell'emulsione.

Il fenomeno della coagulazione chimica dipende dalla acidità o basicità dell'emulsione: si definiscono infatti le emulsioni anioniche (basiche) e quelle cationiche (acide). In un'emulsione anionica gli ioni del globulo di bitume assumono carica polare negativa in una fase alcalina, mentre in un'emulsione cationica assumono carica positiva in una fase acida [5].

Le emulsioni basiche sono più economiche e più facili da produrre, tuttavia la loro rottura avviene solo chimicamente e quindi sono necessari prodotti chimici catalizzatori che permettono la separazione acqua bitume dopo un certo intervallo di tempo. Per questo motivo, oltre al fatto che rispondono meglio alle esigenze tecniche, le emulsioni anioniche sono più utilizzate, sebbene comunque queste non siano utilizzabili con aggregati acidi quali basalto, porfido e silice [1].

In seguito alla rottura avviene progressivamente la presa, ovvero il bitume perde l'acqua rimasta all'interno e aderisce completamente agli inerti. Tuttavia è proprio in questa fase che l'emulsione presenta delle criticità nelle miscele a freddo, perché [1]:

- Il rivestimento degli inerti non riesce ad essere omogeneo, specie nelle frazioni più grandi
- Il rivestimento ha inizio solo dopo la rottura dell'emulsione e le caratteristiche meccaniche necessarie vengono raggiunte dopo un periodo di maturazione, che in alcuni casi particolari può avvenire anche dopo mesi.

La normativa CEN fornisce la nomenclatura per identificare univocamente i vari tipi di emulsione [1]:

- 1° termine: Lettera C (cationica) o A (anionica)
- 2° termine: Numero corrispondente al contenuto in percentuale di legante bituminoso
- 3° termine: Lettera B (bitume)
- 4° termine: Lettera P (polimero) se è presente una modifica con polimeri
- 5° termine: Lettera F (flussante) se è presente in quantità maggiori al 2%

- 6° termine: Numero da 2 a 6 che indica la classe di velocità di rottura, dove 2 indica una velocità di rottura molto rapida e 6 una velocità di rottura molto lenta.
- 7° termine: Lettera O se è sovrastabilizzata

Nella sperimentazione messa in atto è stata utilizzata un'emulsione modificata con polimeri SBS.

3.3.1 Emulsione Modificata con Polimeri SBS – RIGEVAL CM

È un tipo di emulsione utilizzata per realizzare conglomerati bituminosi con la tecnica del riciclaggio a freddo, sfruttando RAP, cemento Portland e/o calce idrata. È realizzata con bitume modificato e si utilizza principalmente in impianto fisso. La modifica avviene con l'immissione di polimeri elastomerici SBS (stirene-butadiene-stirene) che permettono alla miscela finale un miglioramento del comportamento elastico e duttile, con conseguente incremento della deformazione, della sollecitazione e della resistenza a carichi ciclici.

La modifica del bitume avviene miscelando bitume e polimero per mezzo di mescolatori ad alto gradiente di taglio che ne consentono l'omogenea dispersione all'interno della massa. Solo dopo questo processo la miscela di bitume e polimero, chiamata PmB, viene miscelata con la soluzione acquosa per produrre l'emulsione bituminosa. Questa miscela viene definita monofase in quanto è caratterizzata da un'unica fase dispersa di goccioline di bitume modificato.

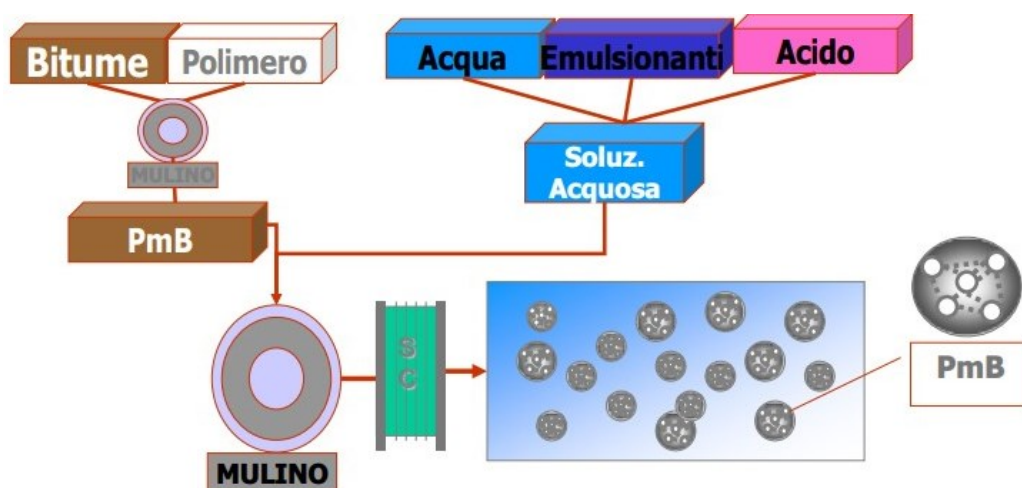


Figura 3.5 - Schema produttivo emulsioni di bitume modificato

Analogamente alle emulsioni tradizionali, il prodotto deve essere messo in opera a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C e lo stoccaggio deve avvenire tra i 10°C e i 70°C. La miscela necessita di essere movimentata periodicamente per rimuovere eventuali sedimenti, tuttavia è sconsigliato l'utilizzo di agitatori a pale, che potrebbero avere problemi in presenza di gelo.

Nella sperimentazione eseguita è stata utilizzata l'emulsione RIGEVAL CM prodotta dalla ditta Valli Zabban. Di seguito viene presentata la scheda tecnica:

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

Figura 3.6 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGEVAL CM

3.4 Cemento Portland

L'evoluzione della ricerca nel campo del riciclaggio a freddo ha promosso l'utilizzo dei leganti idraulici, ovvero cemento e calce, al fianco del legante organico: infatti il loro contemporaneo utilizzo accresce le caratteristiche in esercizio della miscela.

Nel riciclaggio a freddo il maggior legante idraulico utilizzato è il cemento Portland, d'altoforno o pozzolanico, con classe di resistenza 32,5 R.



Figura 3.7 - Cemento Portland 32,5 R

Il cemento Portland, il più importante dei leganti idraulici, è il prodotto che si ottiene dalla miscelazione del clinker, con l'aggiunta di gesso biidrato oppure, più raramente, di anidrite naturale. Il clinker è il componente base per la produzione del cemento si ottiene dalla cottura delle materie prime, ovvero: calcari, argille, sabbie e ceneri di pirite; la cottura avviene in forni rotanti e la temperatura di cottura è compresa tra 1300-1450 °C. All'aumentare della temperatura si ha l'evaporazione dell'acqua, la decomposizione delle argille, dei carbonati; e si manifestano delle reazioni chimiche che portano alla formazione di C_3A , C_2S , C_3S ; poi durante il raffreddamento si formano C_4AF . I C_3A , C_2S , C_3S e C_4AF sono i componenti del clinker e i silicati (C_2S , C_3S) sono presenti in quantità maggiore (75-80%), gli alluminati (C_3A , C_4AF) in quantità inferiore (25-20%). I silicati sono i responsabili dell'indurimento mentre gli alluminati della presa.

Per migliorare le caratteristiche del prodotto finito, al clinker viene aggiunto circa il 5% di gesso o di solfato di calcio, come regolatore di presa, e la miscela viene finemente macinata per aumentare la superficie specifica e quindi la sua reattività [19].

3.4.1 Idratazione, presa e indurimento

Quando il cemento Portland viene miscelato con l'acqua, a seconda del quantitativo di acqua impiegato, si presenta più o meno fluido permettendo anche un'eccellente deformabilità. In questa fase, la pasta di cemento (come il calcestruzzo) può essere: rimescolata, trasportata, introdotta all'interno di uno stampo assumendone la forma e compattata. Il prodotto, nelle

ore successive inizia a solidificare perdendo le iniziali caratteristiche di fluidità e di lavorabilità e divenendo sempre meno deformabile: processo di presa.

Infine, solitamente dopo 24 ore, avviene la fase dell'indurimento vero e proprio che coincide con la trasformazione dell'impasto in una massa, dall'aspetto tipico dei materiali lapidei, dotata di apprezzabile resistenza meccanica a compressione.

Le fasi del processo sono il risultato di un insieme di reazioni chimiche tra i costituenti del cemento e l'acqua d'impasto.

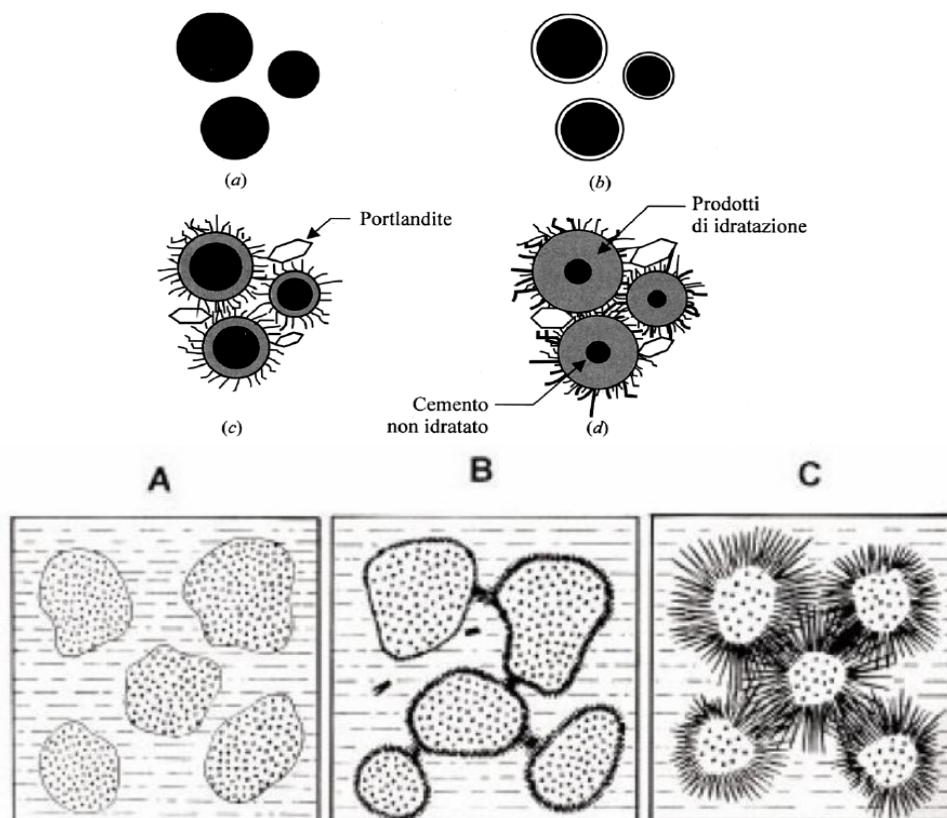


Figura 3.8 - Processo d'idratazione del cemento

Questa rappresentazione schematizza le fasi dell'idratazione del cemento nei tre stadi sopra descritti:

- A. Idratazione: ha inizio subito dopo la miscelazione ed ha una durata di qualche decina di minuti;
- B. Presa: si sviluppa in seguito alla formazione di ettringite e dura qualche ora;
- C. Indurimento: inizia poco prima di un giorno in seguito allo sviluppo fibroso del prodotto idratato.

La resistenza meccanica della pasta indurita dipende dal grado d'idratazione del cemento e dalla distanza originaria dei granuli dello stesso e cioè dal rapporto acqua/cemento nell'impasto.

3.4.1.1 Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento

L'idratazione del cemento dipende fortemente dalla temperatura: quasi tutti i cementi sono progettati per sviluppare le loro caratteristiche ottimali a temperatura ambiente, circa tra 10°C e 30°C. Quando la temperatura si trova al di fuori di questo range, sia la presa sia l'indurimento risultano sensibilmente modificati [17].

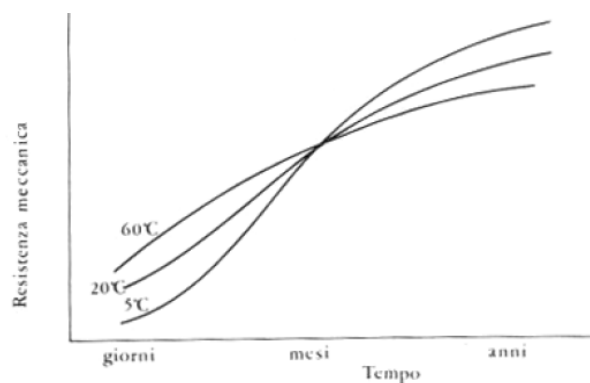


Figura 3.9 - Influenza della temperatura sulla resistenza meccanica nel tempo

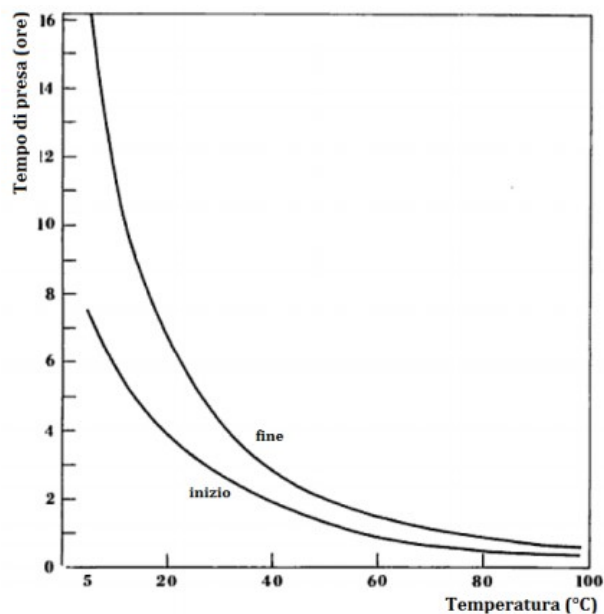


Figura 3.10 - Influenza della temperatura sui tempi iniziali e finali di presa

Dalle figure precedenti è possibile osservare che:

-
- un aumento della temperatura provoca un'evidente riduzione del tempo di presa, in particolare di quello finale;
 - la maturazione del calcestruzzo, in caso di temperatura superiore a 30°C, genera eccessiva evaporazione e una rapida idratazione del conglomerato cementizio: ciò produce un aumento della resistenza meccanica a brevi stagionature, ma una diminuzione della resistenza meccanica a quelle lunghe;
 - le basse temperature provocano una maturazione più lenta e basse resistenze meccaniche nel breve termine, ma permettono al calcestruzzo di raggiungere più alte resistenze a compressione per lunghe stagionature.

3.4.2 Proprietà e ruolo del cemento nella pavimentazione

A seconda del ruolo che la miscela ha nel pacchetto stradale, in abbinamento all'emulsione bituminosa può essere usato il cemento Portland, in particolare quello con classe di resistenza 32,5 R. Come già illustrato, il cemento è un legante idraulico che, a contatto con l'acqua dell'emulsione e di aggiunta, sviluppa le sue caratteristiche, ma può essere usato anche come filler per completare la curva granulometrica.

Le percentuali d'impiego variano a seconda dello strato da realizzare: la tendenza è quella di impiegarlo nell'ordine del 1-3% sulla massa degli aggregati, nel caso dei conglomerati bituminosi. Dosaggi maggiori tendono a snaturare il comportamento della miscela che perderebbe le caratteristiche di un conglomerato bituminoso, avvicinandosi a quelle di un misto cementato [18].

Per il suo specifico processo d'idratazione e maturazione, tale elemento determina le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche delle miscele. La funzione principale è quella di aumentare la resistenza meccanica che dipende principalmente dal quantitativo di cemento aggiunto, ma dipende anche dal materiale trattato. Tuttavia, aumentando il dosaggio di cemento in modo eccessivo, allo scopo di ottenere una maggiore resistenza, può portare alla riduzione delle prestazioni dello strato: il materiale trattato con una sostanza stabilizzante cementizia tende ad essere mediamente fragile. Aumentare la resistenza del materiale significa renderlo ancora più fragile, perciò la miscela presenta una diminuzione delle proprie caratteristiche a fatica; in tale situazione le continue sollecitazioni dovute al carico esercitato

dagli automezzi comportano inevitabilmente un aumento delle fessurazioni che rappresentano, ovviamente, una caratteristica negativa per lo strato di una pavimentazione stradale.

Un altro aspetto molto importante legato alla presenza del cemento nelle miscele stabilizzate a freddo con emulsione riguarda il contenuto d'acqua nell'impasto. Innanzitutto, l'idratazione è necessaria per attivare il cemento e questo si può verificare solamente nelle miscele a freddo, per la disponibilità di acqua; l'eventuale assenza di quest'ultima condizionerebbe il comportamento del cemento che diventerebbe un semplice filler inerte. In secondo luogo, la presenza di tale componente abbinata all'emulsione di bitume produce un effetto positivo: l'idratazione sottrae acqua all'impasto e la reazione esotermica produce calore, favorendo la rottura dell'emulsione da un lato e la presa finale dall'altro. Ciò evidenzia l'importanza del cemento, anche come agente di adesione per il legante nelle miscele bituminose a base d'emulsione [17].

3.5 Acqua

Nella produzione di miscele in conglomerato bituminoso, l'acqua gioca un ruolo chiave, perciò è bene prestare attenzione a quale utilizzare: infatti l'acqua che si trova in natura può non risultare adatta ad essere impiegata in un materiale stabilizzato con emulsione e cemento a causa delle impurità in essa presenti, sia in soluzione, sia in sospensione. In particolare, l'eventuale presenza di ioni positivi e negativi può influenzare le proprietà delle emulsioni di bitume, inoltre la presenza di solfati può influenzare la presa del cemento. L'acqua impiegata deve, quindi, essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva che possa alterare le proprietà della miscela e influire negativamente sui processi necessari per la sua maturazione [17].

Al fine di creare una miscela con la densità ottimale, è necessario introdurre il giusto quantitativo d'acqua e verificarlo, mediante prove di costipamento (come, ad esempio, la pressa a taglio giratoria). La quantità di acqua per i conglomerati riciclati a freddo si aggira generalmente intorno a 5-7% rispetto alla massa del fresato [1].

La miscela da comporre e compattare in opera presenta un contenuto significativo di acqua che deriva [1]:

-
- dalla frazione acquosa dell'emulsione bituminosa;
 - dall'acqua di raffreddamento delle frese nel processo di demolizione;
 - dall'umidità del fresato, estremamente variabile a seconda delle condizioni atmosferiche.

Il quantitativo totale di acqua è dato dalla somma dell'umidità degli aggregati, dall'acqua presente nell'emulsione e da quella di pre-bagnatura.

3.5.1 Ruolo dell'acqua

L'acqua svolge un ruolo fondamentale nel confezionamento delle miscele in conglomerato bituminoso, poiché regola:

- l'addensabilità e la lavorabilità della miscela;
- i meccanismi di rottura dell'emulsione;
- la presa e l'indurimento della frazione cementizia;
- i tempi di riapertura al traffico.

I materiali argillosi o le frazioni di terreno pesante possono essere ammorbiditi grazie all'aggiunta di acqua agli aggregati durante la miscelazione e, questo fattore, è in grado di rompere eventuali agglomerati e permettere una distribuzione più uniforme all'interno della miscela. Inoltre, separando le particelle fini e sospendendole in un mezzo liquido, crea dei canali attraverso i quali penetrerà il legante, che poi andrà a rivestire le particelle minerali. Tuttavia, un'eccessiva quantità d'acqua può, quindi, avere conseguenze negative sulla copertura degli aggregati da parte dell'emulsione bituminosa [1].

Nel riciclaggio a freddo, risulta molto importante la lavorabilità e l'addensamento dei conglomerati bituminosi. Uno dei limiti della metodologia del riciclaggio a freddo delle pavimentazioni risiede nella difficoltà di impastare i componenti della miscela e di costipare il materiale, una volta steso. La lavorabilità della miscela è funzione dell'umidità, quindi della quantità di acqua nella miscela: una maggiore umidità implica una migliore lavorabilità.

L'emulsione bituminosa, che si presenta in uno stato liquido, da sola può non essere sufficiente a fornire adeguata lavorabilità. D'altronde, adottare maggiori percentuali d'emulsione comporta un aumento delle difficoltà nel processo di lavorazione. Anche la

presenza del cemento nella miscela non agevola tale proprietà. Per ovviare a tale inconveniente si può operare incrementando il contributo di acqua nell'impasto, pur nel rispetto dei quantitativi ottimali.

È evidente che un maggiore quantitativo di acqua, oltre il quantitativo ottimale, rende la miscela di conglomerato notevolmente più lavorabile rendendolo più fluido; tuttavia l'incomprimibilità dei liquidi si oppone al processo di compattazione, effettuato dai mezzi in opera, e quindi un eccesso d'acqua tende a limitare l'addensamento inficiando le proprietà meccaniche e la durabilità della miscela.

Da ultimo, l'intrinseca impermeabilità all'acqua ed all'aria degli strati che costituiscono la pavimentazione condiziona i tragitti ed i tempi di evacuazione dell'acqua dagli strati riciclati e i tempi di sviluppo di determinate resistenze meccaniche, ovvero i tempi di apertura parziale o definitiva al traffico. Anche questo aspetto sottolinea l'importanza di un corretto dosaggio del quantitativo d'acqua nella miscela [1].

3.6 Fibre polimeriche

Le fibre impiegate nella sperimentazione per confezionare le miscele sono le fibre polimeriche plastiche FORTA FI fornite dall'azienda MAHAC SRL.

3.6.1 Il materiale

FORTA FI è una miscela di 3 fibre sintetiche (poliammidica aromatica e poliolefiniche) appositamente studiata per il rinforzo strutturale e per aumentare la durabilità in esercizio, dei conglomerati bituminosi (CB) destinati alla realizzazione dei tappetini di usura per superfici carrabili e pedonabili, binder e lo strato di base.

La miscela è costituita da una fibra ad alto modulo di natura poliammidica aromatica con funzioni strutturali che non altera le sue prestazioni con la temperatura del CB, una fibra monofilamento di polipropilene e una fibra poliolefinica con funzione antiritiro.

L'azione sinergica delle tre fibre nel CB rispetto a quello realizzato con bitume modificato multifunzionale hard, incrementa le proprietà meccaniche, migliora il legame del bitume con

gli inerti, riduce le fessurazioni termiche, di fatica e quelle generate dai giunti delle sottostanti pavimentazioni.

Inoltre, sempre rispetto al conglomerato con bitume modificato hard, il conglomerato con FORTA FI formando un reticolo tridimensionale di fibre strutturali, elimina gli avvallamenti e i solchi del manto bituminoso dovuto al transito di mezzi pesanti (ormai); riduce, inoltre, drasticamente il fenomeno della disgregazione del manto superficiale, dovuto al distacco degli inerti dalla matrice bituminosa.

Le fibre conferendo un rinforzo tridimensionale ai conglomerati bituminosi, riducono la mobilità e aumentando la viscosità del bitume standard al fine da essere utilizzato in sostituzione del bitume multifunzionale hard, per manti sottili, manti drenanti, conglomerati bituminosi di tipo chiuso, aperto e porosi.

3.6.2 Le proprietà



Figura 3.11 – Fibre FORTA FI

Fibre	Poliammidica Aromatica	Poliolenfiniche
Densità (kg/m ³)	1,44	910
Resistenza a trazione (Mpa)	2758	650
Temperatura di esercizio (°C)	-40 : +400 °C	+180
Lunghezza (mm)	19	19
Forma	Monofilamento	Fibrillate
Resistenza agli alcali/acidi	Totale	Totale

Tabella 3.3 – Proprietà Fibre FORTA FI

L'aggiunta di FORTA FI al CB influenza le caratteristiche chimico-fisiche-meccaniche in fase plastica e dopo indurimento.

In particolare, la viscosità del bitume alle basse temperature non è influenzata dalla presenza delle fibre; mentre possiamo considerarla trascurabile alle alte temperature dove la viscosità aumenta all'aumentare della temperatura stessa.

In altre parole la variazione di viscosità del bitume è così elevata alle alte temperature che l'incremento dovuto alla presenza delle fibre risulta trascurabile.

La principale caratteristica del conglomerato bituminoso con FORTA FI (CB-FORTA FI) è quella di aumentare l'energia residua rispetto a quello senza fibre.

Questa proprietà si traduce, per il conglomerato bituminoso fibro-rinforzato, in un incremento della resistenza alla propagazione delle fessure, che dipende da diversi fattori quali i carichi di traffico veicolare, le escursioni termiche, l'invecchiamento del bitume con conseguente perdita di elasticità del manto di usura.

3.6.3 I campi di applicazione

FORTA FI è stata progettata per applicazioni strutturali nello strato di base, nel binder e nello strato di usura.

Per le prestazioni sopra descritte è adatta in particolare per:

- Pavimentazioni stradali ed autostradali (drenanti e non)
- Piste aeroportuali
- Parcheggi commerciali ed industriali
- Marciapiedi
- Piste ciclabili

3.6.4 Prestazioni del conglomerato bituminoso con FORTA FI

3.6.4.1 Mix design

Conglomerato bituminoso realizzato con bitume standard tipo 50/70 (CB.Std)

Conglomerato bituminoso realizzato con bitume modificato hard (CB.H)

Conglomerato bituminoso realizzato con bitume standard tipo 50/70 con aggiunta di FORTA FI (CB-FORTA FI)

L'obiettivo delle prove è stato quello di mostrare il netto miglioramento prestazionale del conglomerato bituminoso in fase plastica e dopo indurimento per strato di usura, addizionato con FORTA FI.

Miscela	CB 50/70	CB Hard	CB 50/70 con FORTA FI
Componenti	Quantità per 1000 kg CB (Kg)	Quantità per 1000 kg CB (Kg)	Quantità per 1000 kg CB (Kg)
Bitume 50/70	56,6		56,6
Bitume Hard		56,6	
Filler	44,9	44,9	44,9
Aggregato fine	763,7	763,7	763,7
Aggregato medio	134,8	134,8	134,8
FORTA FI			0,5

tabella 3.4 – Mix design delle miscele

3.6.4.2 Determinazione del contenuto dei vuoti secondo UNI EN 12697-31

Il contenuto dei vuoti di un CB è la percentuale volumetrica dei vuoti intergranulari, non riempiti dal legante bituminoso che rimangono all'interno della miscela anche dopo rullatura in sito o compattazione in laboratorio. Le proprietà meccaniche del CB dipendono da questo valore: più è basso migliore sono le prestazioni. Tale valore è prescritto dai capitolati in funzione dell'applicazione.

I test riportati in tabella, mostrano che il CB con aggiunta di FORTA FI presenta una riduzione dei vuoti paragonabile a quella ottenuta con CB confezionato con bitume modificato hard.

riduzione dei vuoti rispetto al conglomerato confezionato con bitume Standard tipo 50/70		
	Riduzione vuoti %	
	CB HARD	CB CON FORTA FI
Numero giri compattazione 10	24,1	17,2
Numero giri compattazione 100	38,5	30,7
Numero giri compattazione 210	48,4	42,3

tabella 3.5 – Riduzione dei vuoti

3.6.4.3 Stabilità, scorrimento e rigidezza – Prova Marshall UNI EN 12697-30,34,12

Controllare la “stabilità” della pavimentazione significa valutare la sua deformabilità misurando due grandezze fisiche, il carico di rottura e la conseguente deformazione. Dal rapporto di queste due grandezze fisiche si ricava la rigidezza che, unitamente al valore della stabilità, determina la durabilità del CB: aumenta all’aumentare di stabilità e rigidezza.

In tabella sono riportati i risultati confrontando tre CB, realizzati rispettivamente con bitume standard 50/70, bitume modificato hard e del bitume standard tipo 50/70 con aggiunta di FORTA FI.

Dal confronto dei valori della stabilità e della rigidezza, il CB con FORTA FI risulta più performante del CB con bitume modificato hard e del CB con bitume standard 50/70.

Prova Marshall		
Tempo Iniziale T_0	Stabilità corretta (kg)	Rigidezza (kg/mm)
CB Bitume 50/70	1565	684
CB Bitume Mod. Hard	1808	719
CB Bitume 50/70 con FORTA FI	1900	719
Tempo T_{15}		
CB Bitume 50/70	1290	471
CB Bitume Mod. Hard	1560	516
CB Bitume 50/70 con FORTA FI	1648	533

tabella 3.6 – Risultati prova Marshall

Nella tabella sottostante sono riportati i valori di incremento della “stabilità corretta” e “rigidezza” con CB con bitume modificato hard e CB standard 50/70 addizionato con FORTA FI.

Dall’analisi si evince che aggiungendo al CB con bitume 50/70 le fibre FORTA FI si ottengono incrementi di stabilità e rigidezza paragonabili al CB con bitume modificato hard.

Incremento di stabilità corretta e rigidezza		
Tempo Iniziale T_0	Incremento stabilità corretta (%)	Incremento Rigidezza (%)
CB Bitume modello Hard	15,6	5,2
CB Bitume 50/70 con FORTA FI	21,4	5,1
Confronto al Tempo T_{15}		
CB Bitume modello Hard	21	9,7
CB Bitume 50/70 con FORTA FI	27,8	13,4

tabella 3.7 – Incremento di stabilità corretta e rigidezza

3.6.4.4 Resistenza a trazione indiretta (T_0 e T_{15}) (UNI EN 12697-23)

La resistenza a trazione indiretta indica la massima tensione di trazione applicata al conglomerato bituminoso caricato diametralmente fino rottura. La misura di questa proprietà meccanica è legata al danno da fatica che subiscono le pavimentazioni bituminose sotto l'azione dei carichi dovuti al traffico veicolare.

Le prove sono state eseguite sulle tre tipologie di CB (CB con bitume 50/70, CB con bitume modello hard, e CB con bitume 50/70 e fibre FORTE FI) determinando la resistenza a trazione indiretta e il coefficiente di trazione indiretta al tempo t_0 e dopo 15 giorni di condizionamento in acqua a +25°C (T_{15}). Anche da queste misure, riportate nelle tabelle che seguono, si evince che l'impiego delle fibre FORTE FI nel CB con bitume standard, determina prestazioni paragonabili al CB con bitume modello hard.

Trazione Indiretta		
Tempo iniziale T_0	Res. Media alla trazione indiretta (N/mm ²)	Coefficiente medio di trazione indiretta (N/mm ²)
CB Bitume std. 50/70	1,57	102,1
CB Bitume mod. Hard	1,72	121,5
CB Bitume 50/70 con FORTA FI	1,95	132,9
Condizionamento 15 gg		
CB Bitume std. 50/70	1,77	109,4
CB Bitume mod. Hard	1,86	124,4
CB Bitume 50/70 con FORTA FI	2,13	137,2

tabella 3.8 – Valori trazione indiretta e coefficiente medio

3.6.4.5 Prova di ormaimento (Wheel Tracking) UNI EN 12697-22

A causa delle sollecitazioni ripetute e per effetto del comportamento viscoso non reversibile dei materiali costituenti le pavimentazioni bituminose (in particolare quelle di tipo flessibile o semi-rigido) si verificano negli strati delle sovrastrutture delle deformazioni permanenti.

Le deformazioni permanenti sono la causa dell'aumento dell'irregolarità del piano viabile, sia in senso trasversale al moto dei veicoli "ormaie", che in senso longitudinale.

Le ormaie sono pericolose perché causano l'aumento dello spessore del velo idrico durante gli eventi meteorici; mentre l'irregolarità longitudinale induce accelerazione nei veicoli, peggiorando in maniera significativa il comfort di marcia. Per determinare se un CB è sensibile

alla formazione di ormaie si eseguono delle prove secondo il metodo della traccia delle ruote (Wheel Tracking), descritto nelle UNI EN 12697-22 UNI EN 12697-6.

In estrema sintesi lo scopo della prova è la determinazione della tendenza dei conglomerati bituminosi a deformarsi sotto carico.

Le figure mostrano gli effetti positivi delle fibre FORTA FI nel ridurre la tendenza alla deformazione del CB, misurando la profondità e la pendenza delle ormaie.

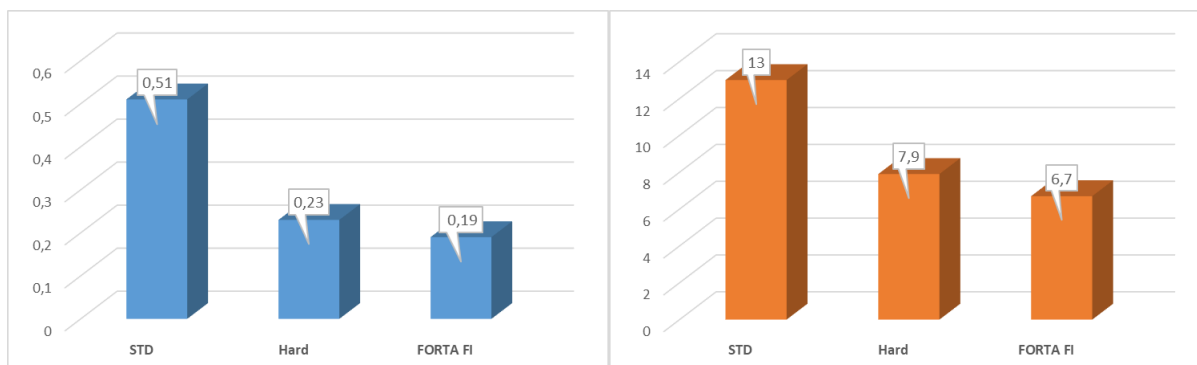


Figura 3.12 - WTSair- Pendenza media della curva di ormaio tra 5000 e 10000 cicli (mm/1000)

Figura 3.13 - PRD air- Profondità proporzionale media del solco formato a 10000 cicli (%)

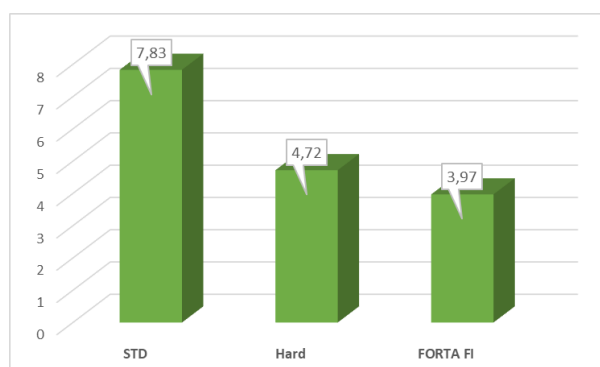


Figura 3.14 - RD air- Profondità media del solco formato a 10000 cicli (mm)

Nella tabella che segue vengono evidenziate in termini percentuali le superiori proprietà del conglomerato addizionato con FORTA FI rispetto al CB confezionato con bitume multifunzionale hard. In particolare:

- Riduzione della pendenza media della curva di ormaio tra 5000 e 10000 cicli (WTSAir);

- Riduzione della profondità proporzionale media del solco formato a 10000 cicli (PRDAir);
- Riduzione della profondità media del solco formato a 10000 cicli (RDAir).

Variazione rispetto al CB con bitume std (Ormaiamento - Wheel Tracking)			
Conglomerato Bituminoso	WTSair (%)	PRDAir (medio)(%)	RDAir (medio)(mm)
CB Hard	54,9	39,2	39,7
CB Std 50/70+ FORTA FI	62,7	48,5	49,3

tabella 3.9 – Variazione delle prestazioni dei conglomerati

3.6.5 Sintesi delle prestazioni tra CB -FORTA FI e CB - Hard

In tabella si riporta una sintesi delle prestazioni del CB con bitume standard 50/70 addizionato con FORTA FI, in confronto con un CB confezionato con bitume hard. Dall'analisi complessiva dei dati possiamo concludere che il CB con FORTA FI non solo può sostituire il CB con bitume standard ma ne supera le prestazioni, implementando la durabilità nelle diverse condizioni di esercizio.

Variazione dei parametri tra CB con bitume standard + Forta F1 e CB con bitume hard		
	Conglomerato confezionato con bitume modificato hard	Conglomerato confezionato con bitume standard tipo 50/70 e Forta FI
	(%)	(%)
Riduzione dei vuoti dopo 10 giri di costipamento	24,1	17,2
Riduzione dei vuoti dopo 100 giri di costipamento	38,5	30,7
Riduzione dei vuoti dopo 210 giri di costipamento	48,4	42,3
Incremento della stabilità corretta al tempo T_0	15,6	21,4
Incremento di rigidità al tempo T_0	5,2	5,1
Incremento della stabilità corretta al tempo T_{15}	21	27,8
Incremento della rigidità al tempo T_{15}	9,7	13,4
Incremento della resistenza media alla trazione indiretta a 25°C, R_{t_m} al tempo T_0	9,7	24,6
Incremento del coefficiente medio di trazione indiretta a 25°C, CTI_m al tempo T_0	19	30,2
Incremento della resistenza media alla trazione indiretta a 25°C, R_{t_m} al tempo T_{15}	5,1	20,3
Incremento del coefficiente medio di trazione indiretta a 25°C, CTI_m al tempo T_{15}	13,8	25,5
WTSair: Riduzione della pendenza media della curva di ormaiamento, tra 5000 e 10000 cicli	54,9	62,7
PRDAir: Riduzione della profondità proporzionale media del solco formato, a 10000 cicli	39,2	48,5
RDAir: Riduzione della profondità media del solco formato a 10000 cicli	39,7	49,3

tabella 3.10 – Sintesi prestazionale tra CB con bitume modificato e CB con FORTA FI

3.6.6 Raccomandazioni per l'uso

FORTA FI va aggiunta all'impianto di miscelazione dopo che sono stati aggiunti tutti gli inerti e comunque prima del bitume liquido.

Grazie alla rapida dispersione delle fibre, non occorre modificare le normali modalità operative per la preparazione del conglomerato bituminoso.

Confezioni e dosaggio

FORTA FI viene commercializzata in sacchetti da 0.5 Kg.

Dosaggio 0.5 Kg/ton di conglomerato bituminoso [20].

Capitolo 4 - Test Methods e Programma Sperimentale

In questo capitolo viene riportato il programma sperimentale, con i relativi obiettivi, le apparecchiature adoperate e le metodologie di prova eseguite.

4.1 Apparecchiature e protocolli di prova

In questo paragrafo vengono riportate tutte le metodologie di prova utilizzate durante la sperimentazione.

4.1.1 Analisi granulometrica

Si tratta di una procedura che consente la vagliatura del materiale incoerente e viene effettuata per mezzo di una serie di setacci. Un setaccio, anche detto crivello, può essere a maglia circolare o quadrata ed è caratterizzato da una determinata apertura delle maglie.



Figura 4.1 - Setaccio a maglia quadrata

I setacci vengono impilati e disposti con apertura crescente dal basso verso l'alto, alla base della pila viene posto un fondo, ovvero un contenitore cilindrico dello stesso diametro dei setacci, ma chiuso per raccogliere tutto il materiale più fine dell'ultimo setaccio. Il materiale viene posizionato in sommità e la pila viene agitata orizzontalmente, in questo modo i granuli di diverse dimensioni verranno bloccati al rispettivo setaccio. Il diametro dei singoli granuli corrisponde rispettivamente al diametro della maglia circolare o alla diagonale della maglia quadrata del setaccio che li trattiene.

La pila è stata composta dai seguenti setacci:

d [mm]
31,5
20
16
10
8
4
2
1
0,5
0,25
0,125
0,063
FONDO

Tabella 4.1 - Apertura setacci per Analisi Granulometrica

La pila con il materiale viene posizionata in un vibro-vaglio che, attraverso un'azione meccanica, facilita la vagliatura. Il vibro-vaglio impartisce un'oscillazione orizzontale, questa viene applicata per 5-10 minuti in modo da ottenere una corretta vagliatura.

Alla fine della vagliatura, il contenuto di ogni setaccio viene pesato: la quantità di materiale contenuta in un singolo setaccio corrisponde alla quantità di trattenuto parziale relativo a quel setaccio.



Figura 4.2 - Pila di setacci posizionata nel vibro-vaglio

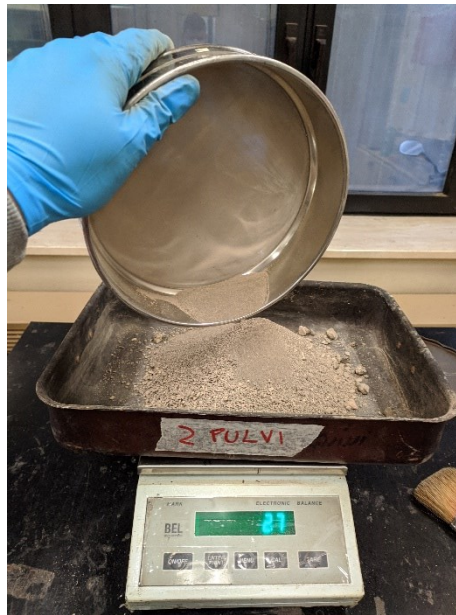


Figura 4.3 - Pesa del contenuto di ogni setaccio

Noto il trattenuto parziale per ogni setaccio si calcola la percentuale, rispetto alla massa iniziale del campione, di trattenuto parziale e anche la percentuale di trattenuto cumulativa sommando progressivamente le varie percentuali di trattenuto. A questo punto è possibile calcolare la percentuale di passante per ogni setaccio semplicemente calcolando il reciproco a 100 per il trattenuto cumulato.

Campione	Perugia_1			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	63,9	2,6	2,6	97,4
16	82,9	3,4	6,0	94,0
10	225,7	9,2	15,2	84,8
8	250,1	10,2	25,4	74,6
4	574,8	23,4	48,8	51,2
2	437,4	17,8	66,6	33,4
1	324,8	13,2	79,8	20,2
0,5	204,3	8,3	88,1	11,9
0,25	107,7	4,4	92,5	7,5
0,125	86,6	3,5	96,0	4,0
0,063	31,5	1,3	97,3	2,7
FONDO	69,2	2,8	100	0

Figura 4.4 - Esempio di calcolo delle percentuali di passante

Note le percentuali di passante per ogni setaccio si può graficare la curva granulometrica:

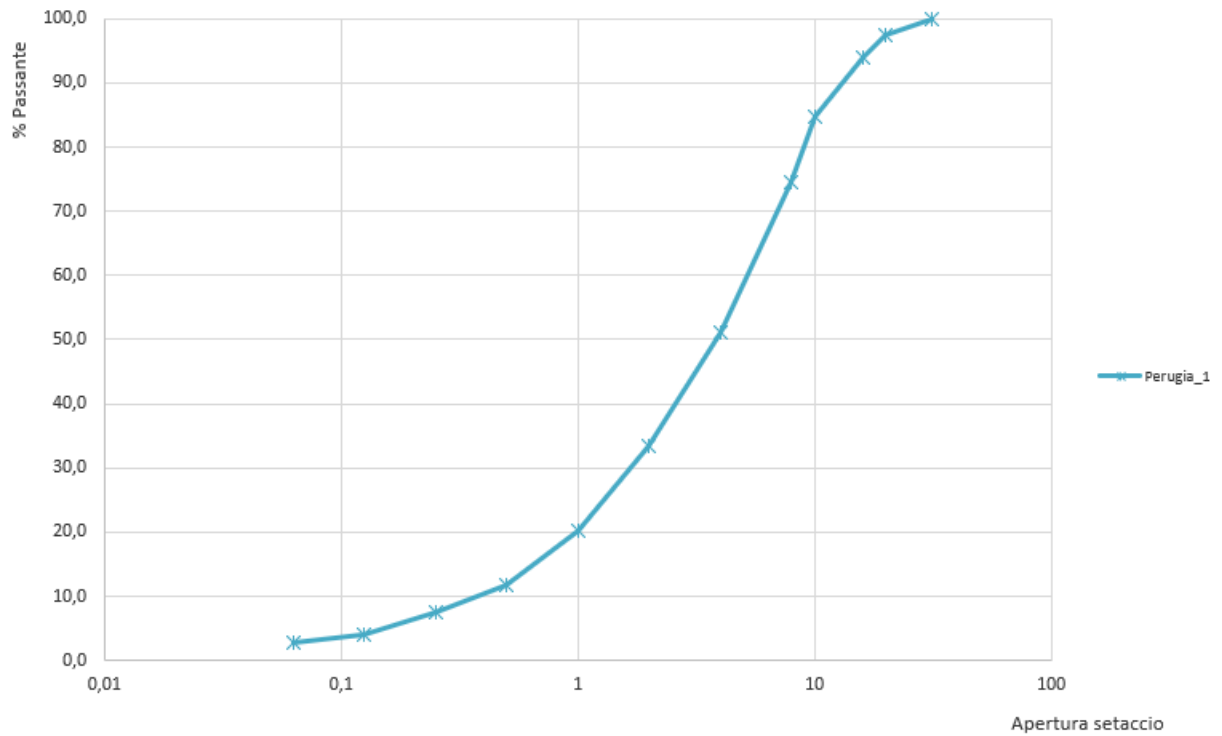


Figura 4.5 - Esempio di curva granulometrica

4.1.2 Massa volumica ed assorbimento degli aggregati

Per determinare la massa volumica e l'assorbimento d'acqua di corpi solidi viene utilizzato il picnometro in vetro.



Figura 4.6 - Picnometro

Prima di tutto il campione di materiale (RAP) viene setacciato in due pezzature diverse:

- 4 mm - 31,5 mm;

- 0,063 mm - 4 mm.

Quindi si utilizzano due picnometri, uno per l'aggregato fine e uno per l'aggregato grosso; questo perché i picnometri hanno l'apertura di diametro diverso e in quello più piccolo il materiale grosso non entrerebbe, inoltre separare le due frazioni aiuta nella procedura successiva; all'interno dei picnometri viene inserito il materiale come segue:

- Circa 1,5 kg di materiale a pezzatura grossa, ovvero 4 mm - 31,5 mm, precedentemente setacciato;
- Circa 1 kg di aggregati a pezzatura fine, ovvero 0,063 mm - 4 mm.

Viene inserita acqua nei picnometri fino a sommergere completamente gli aggregati e si eliminano le bolle d'aria rimaste intrappolate agitando il picnometro e per mezzo di una pompa per sottovuoto, che agisce per circa 20 minuti.

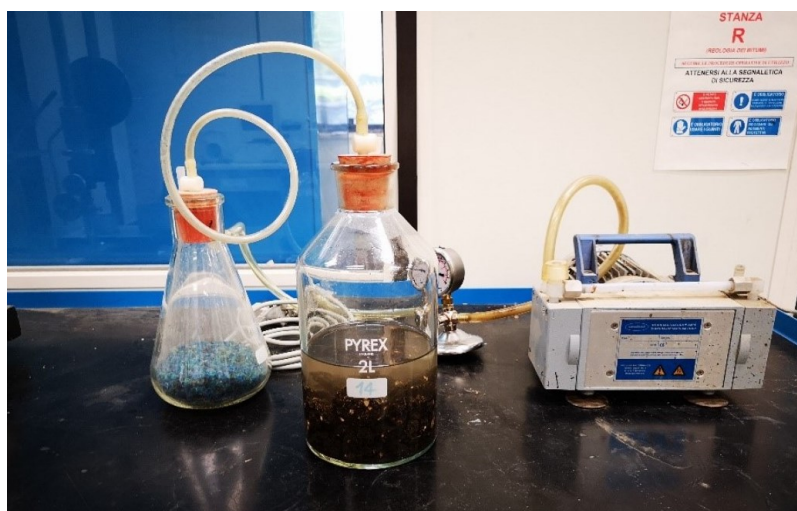


Figura 4.7 - Picnometro collegato alla pompa per sottovuoto

Una volta completata l'aspirazione delle bolle d'aria, i picnometri vengono messi, insieme a delle bottiglie d'acqua, in camera climatica a 20°C per una notte. Il giorno successivo, i picnometri vengono sottoposti nuovamente alla pompa per sottovuoto per altri 15 – 20 minuti.

Si posiziona il tappo sul picnometro e si riempie quest'ultimo di acqua fino alla tacca che si trova sul tappo. Si asciuga esternamente il picnometro e lo si pesa su una bilancia di precisione misurando la massa M_2 .

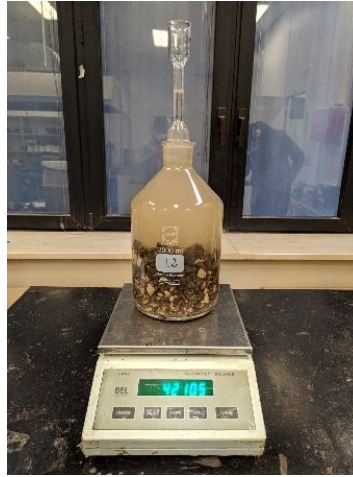


Figura 4.8 - Misura della massa M_2

Utilizzando un termometro ad ago si misura la temperatura dell'acqua T_1 e si verifica che sia $22 \pm 3^\circ\text{C}$.

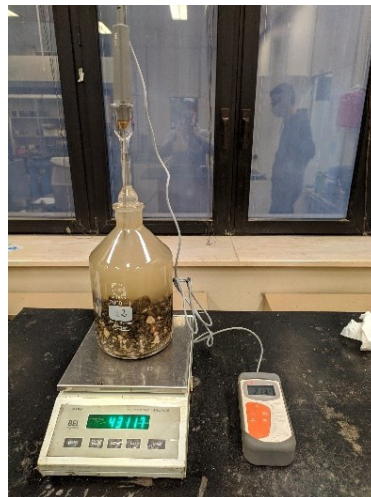


Figura 4.9 - Misura della temperatura T_1

Da questo punto in poi la procedura si separa in due metodi diversi, uno per la pezzatura grossa e uno per la pezzatura fine:

4.1.2.1 Procedura per aggregati di pezzatura 4 mm – 31,5 mm

Il contenuto del picnometro viene versato in un setaccio con apertura 2 mm, in modo da far defluire solo l'acqua e non perdere materiale. Il trattenuto viene posizionato su un piano sufficientemente ampio su cui è stato apposto un panno assorbente per eliminare l'acqua in eccesso. Il materiale steso viene poi tamponato con un panno fino a raggiungere la condizione

di superficie satura asciutta (SSA), ovvero l'aggregato deve essere umido ma non deve avere il film d'acqua sulla superficie.



Figura 4.10 - Materiale in condizioni di superficie satura asciutta (SSA)

Viene pesata una teglia in alluminio vuota, misurando la grandezza $tara1$. Su questa teglia viene versato il materiale in condizione SSA e si ottiene la massa $M1$ sottraendo la $tara1$. A questo punto la teglia viene posta in forno a 40°C e il giorno successivo si va a pesare la teglia con il materiale essiccato e sottraendo $tara1$ si ottiene la massa $M4$, massa dell'aggregato secco.



Figura 4.11 - Forno

Si prende il picnometro vuoto con il tappo inserito, si riempie d'acqua fino al menisco e si misura la massa $M3$ e la temperatura che non deve variare più di 2°C da $T1$.

4.1.2.2 Procedura per aggregati di pezzatura 0,063 mm – 4 mm

Il contenuto del picnometro viene versato in un setaccio da 0,063 mm in modo da separare aggregati e acqua, in questo modo oltre l'acqua si elimina la parte di materiale inferiore a 0,063 mm. Il trattenuto viene posizionato in una teglia precedentemente tarata e viene messo in forno a 40°C per 30 minuti per togliere l'acqua in eccesso.

Vengono utilizzati tre attrezzi: un cono cavo, una spatola e un pistone. Questi tre attrezzi vengono dapprima pesati insieme al materiale per avere la tara, poi, dopo un determinato intervallo di tempo, la teglia viene tolta dal forno e grazie agli attrezzi si va ad inserire del materiale nel cono fino a riempire il cono, senza forzare l'ingresso del materiale, poi con la spatola si spiana la superficie superiore.

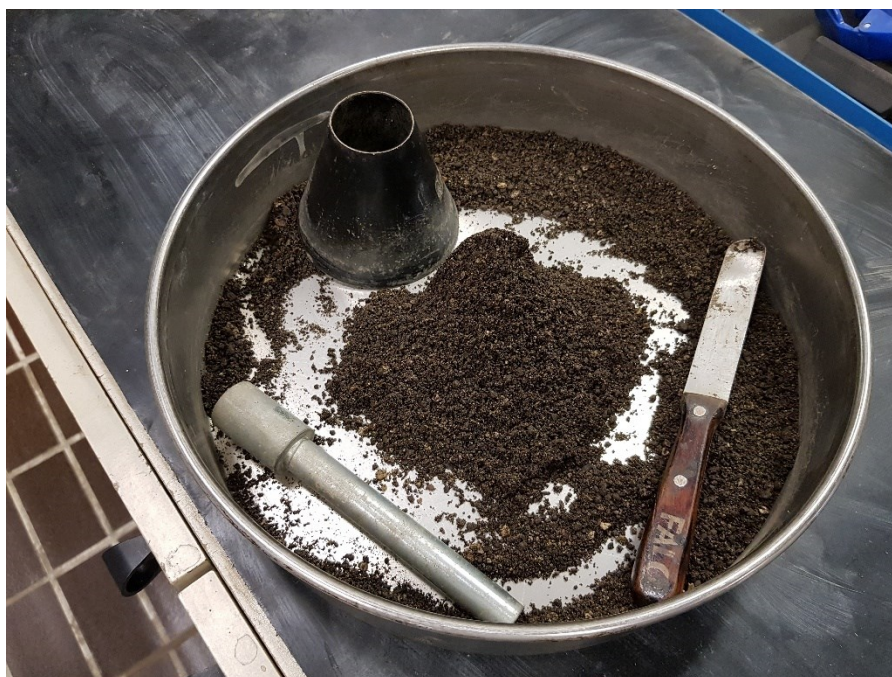


Figura 4.12 - Teglia con materiale, spatola, pistone e cono

Tramite il pistone si danno 25 colpi sulla superficie del materiale in cima al cono e si toglie il cono. A questo punto bisogna valutare la forma assunta dal materiale contenuto nel cono, confrontandola con le seguenti foto:

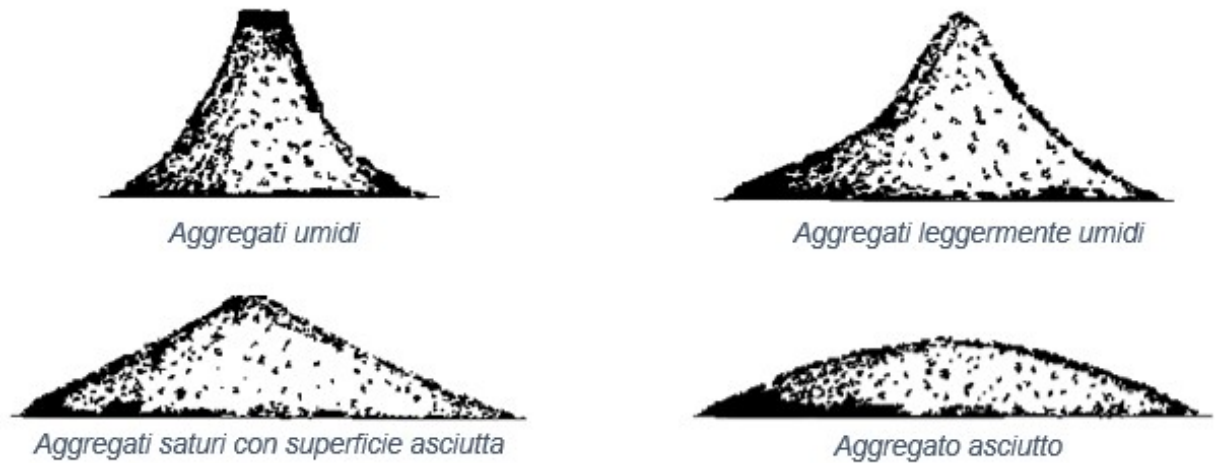


Figura 4.13 - Possibili configurazioni del materiale dopo la rimozione del cono

Una volta raggiunta la condizione di superficie satura asciutta, la teglia con tutti gli utensili viene pesata e sottraendo la tara si ottiene $M1$. A questo punto la teglia viene messa in forno e dopo un giorno pesata nuovamente ottenendo $M4$. Il picnometro viene riempito di acqua fino alla tacca e si misura la massa $M3$ e la temperatura che non deve variare più di 2°C da $T1$.

Infine, per entrambe le pezzature si calcolano le masse volumiche e l'assorbimento dell'acqua:

- Massa volumica apparente dei granuli

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

- Massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa

$$\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di SSA

$$\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

- Assorbimento dell'acqua

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

La massa volumica dell'acqua ρ_w dipende dalla temperatura e si ricava dalla seguente tabella:

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 4.2 - Massa volumica dell'acqua in funzione della temperatura

4.1.3 Preparazione dei provini

Il confezionamento dei provini si divide in due fasi:

- Fase 1: Preparazione degli aggregati

La preparazione deve avvenire almeno 12 ore prima della fase 2 in quanto per la seconda fase è necessario avere gli aggregati con solo acqua di assorbimento presente.

In base al mix design scelto, si stabiliscono i dosaggi in peso, ovvero la comunemente detta *ricetta*, di: aggregati, divisi nelle tre frazioni; filler; acqua; emulsione bituminosa; cemento e fibre; in questa sperimentazione.



Figura 4.14 - Dosaggio degli aggregati secondo la ricetta stabilita

A titolo di esempio viene riportato un esempio di ricetta:

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]
RA1	fino	3399
RA2	medio	7155
VA1	grosso	6261
VA2	-	0
VA3	-	0
VA4	-	0
Filler	omya	716
Water (abs)		170,2
Cement	C1-ref	351
Emulsion		701
Water di aggiunta		426
TOTAL		19178
total for each specimen		2841,1

Figura 4.15 - Esempio di ricetta per la preparazione di un impasto

A questo punto gli aggregati vengono messi in forno a 60°C fino al raggiungimento della massa costante in modo da essere asciutti.

Questa fase 1 viene completata all'interno di cassoni di plastica: si rovesciano gli aggregati nel cassone e si aggiunge l'acqua di assorbimento (Water abs), sempre secondo le quantità stabilite dalla ricetta. Fatto ciò, il materiale viene miscelato manualmente e poi il contenitore viene sigillato con un telo di plastica per evitare l'evaporazione dell'acqua.



Figura 4.16 - Cassone di plastica sigillato

- Fase 2: Miscelazione

Il giorno seguente avviene la miscelazione, solamente dopo aver svolto alcune operazioni preliminari:

- Pesare il cemento e l'acqua di aggiunta seguendo la ricetta
- Mescolare bene l'emulsione bituminosa all'interno del suo contenitore per evitare che acqua e bitume all'interno siano separati, e solamente dopo pesare il quantitativo secondo ricetta di emulsione bituminosa.

A questo punto si può procedere alla miscelazione secondo la seguente procedura:

- 1) Gli aggregati vengono trasferiti dal recipiente di plastica al miscelatore.



Figura 4.17 - Miscelatore meccanico



Figura 4.18 - Aggregati versati nel miscelatore

Insieme agli aggregati si versano anche le fibre.



Figura 4.19 - Aggregati e fibre versati nel miscelatore

Si aziona il miscelatore per 60 secondi.

- 2) Viene aggiunto il filler e si miscela nuovamente per 60 secondi.



Figura 4.20 – Filler aggiunto nel miscelatore

- 3) Viene versato metà del cemento previsto dalla ricetta e si ripete la miscelazione per 1 minuto.



Figura 4.21 – Metà cemento nel miscelatore dopo la seconda miscelazione

- 4) Si versa la seconda metà del cemento e si ripete la miscelazione per un altro minuto.
- 5) Si aggiunge metà dell'acqua e si aziona il miscelatore per 1 minuto.



Figura 4.22 - Aggiunta dell'acqua

- 6) Si aggiunge l'emulsione bituminosa precedentemente pesata e si aziona il miscelatore per 1 minuto.



Figura 4.23 - Dosaggio dell'emulsione bituminosa



Figura 4.24 - Emulsione bituminosa nel miscelatore

- 7) Si aggiunge la restante parte di acqua e si aziona il miscelatore meccanico per 1 minuto. Inoltre, è consigliato pulire le pale del miscelatore da eventuali residui ad ogni miscelazione. La miscelazione è così terminata. Dopo ogni miscelazione è buona norma miscelare manualmente il contenuto, per ottenere una miscelazione più omogenea, in quanto nella parte più esterna, lungo la circonferenza, del vano del miscelatore tendono a fermarsi gli aggregati più fini.



Figura 4.25 - Miscela di Riciclaggio a Freddo ultimata

4.1.4 Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)

Il confezionamento dei provini è stato realizzato mediante la pressa a taglio giratoria. Questa macchina è composta da un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella, un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale, e un meccanismo rotante. È dotata inoltre di un sistema di acquisizione e controllo dei dati dal quale è possibile impostare, tra gli altri parametri:

- il tipo di prova, cioè se a numero di giri imposto o ad altezza imposta, che decide quando deve fermarsi la prova,
- la pressione verticale
- il diametro della fustella.



Figura 4.26 – Pressa a taglio giratoria

Tutto il sistema è gestito da un software che inoltre registra l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro, quindi il suo abbassamento dovuto alla compattazione. Al diminuire dell'altezza aumenterà l'addensamento, fino ad un valore massimo caratteristico del materiale.



Figura 4.27 - Schermata iniziale del software

Figura 4.28 - Schermata principale pressa a taglio giratoria

Figura 4.29 - Schermata di avvio prova

La pressa giratoria a taglio realizza la compattazione della miscela attraverso l'applicazione contemporanea di una pressione assiale costante e di una rotazione. È inoltre presente un supporto inclinabile che permette l'applicazione di un angolo di inclinazione di 1,25°, per favorire l'addensamento.

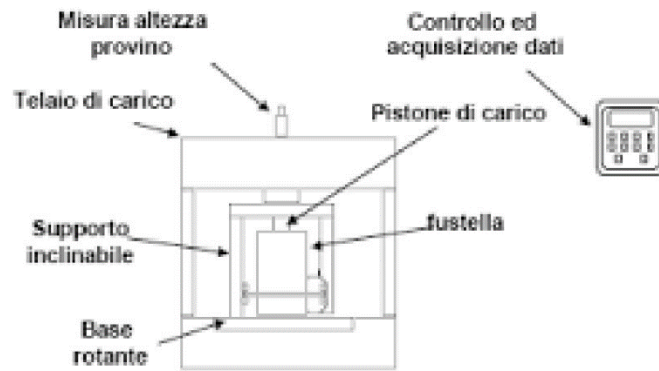


Figura 4.30 - Componenti della pressa a taglio giratoria

La sperimentazione è stata svolta con i seguenti dati:

- Tipo di prova: Numero di giri imposto 100 giri
- Pressione assiale: 600 kPa
- Diametro fustella: 150 mm



Figura 4.31 - Fustella con diametro 150 mm

Alla base della fustella è presente una piastra infinitamente rigida e su questa viene apposto un disco di carta per evitare l'adesione del provino alla piastra stessa.

Il materiale precedentemente miscelato viene inserito nella fustella: la quantità di impasto utilizzata per ogni singolo provino è stata di 2841 g.



Figura 4.32 - Riciclato a freddo inserito nella fustella

Prima di procedere alla compattazione, i componenti della macchina devono essere adeguatamente lubrificati con del grasso per evitare lo sviluppo di attriti: il grasso viene applicato sull'incasso della fustella, sugli snodi, sul pistone e sul piano d'appoggio.



Figura 4.33 - Lubrificazione del piano di appoggio

Eseguita questa fase la fustella può essere inserita nella macchina.



Figura 4.34 - Inserimento della fustella nella macchina

Ha inizio la prova: il pistone scende e applica la pressione assiale; la fustella viene inclinata di $1,25^\circ$ e inizia a ruotare attorno al proprio asse a velocità costante. Ultimato il numero di rivoluzioni impostato si dimezza l'angolo di inclinazione e si effettuano altre 3 rivoluzioni, poi si rimuove l'altra metà dell'angolo e si effettuano ulteriori 3 rivoluzioni. Quindi si aggiungono 6 rivoluzioni al numero delle rivoluzioni impostato, che non vengono considerati nell'estrapolazione dei dati. Fatto ciò, il pistone sale ed è possibile estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.



Figura 4.35 - Prova in esecuzione

La prova si conclude con l'estrazione del provino: dopo aver adeguatamente incastrato la fustella nei supporti dell'estrattore, un martinetto idraulico solleva la base infinitamente rigida e il provino provocandone la fuoriuscita.



Figura 4.36 - Estrazione del provino

Durante la prova il software registra l'altezza del provino a ogni singolo giro, permettendo di ottenere le curve di compattazione.

Note le curve di compattazione, è stato calcolato il valore per ogni giro:

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

In base ai dati ottenuti si è andati a costruire il grafico con il numero di giri alle ascisse e C alle ordinate. Tramite un'interpolazione dei punti si può definire l'equazione di una retta.

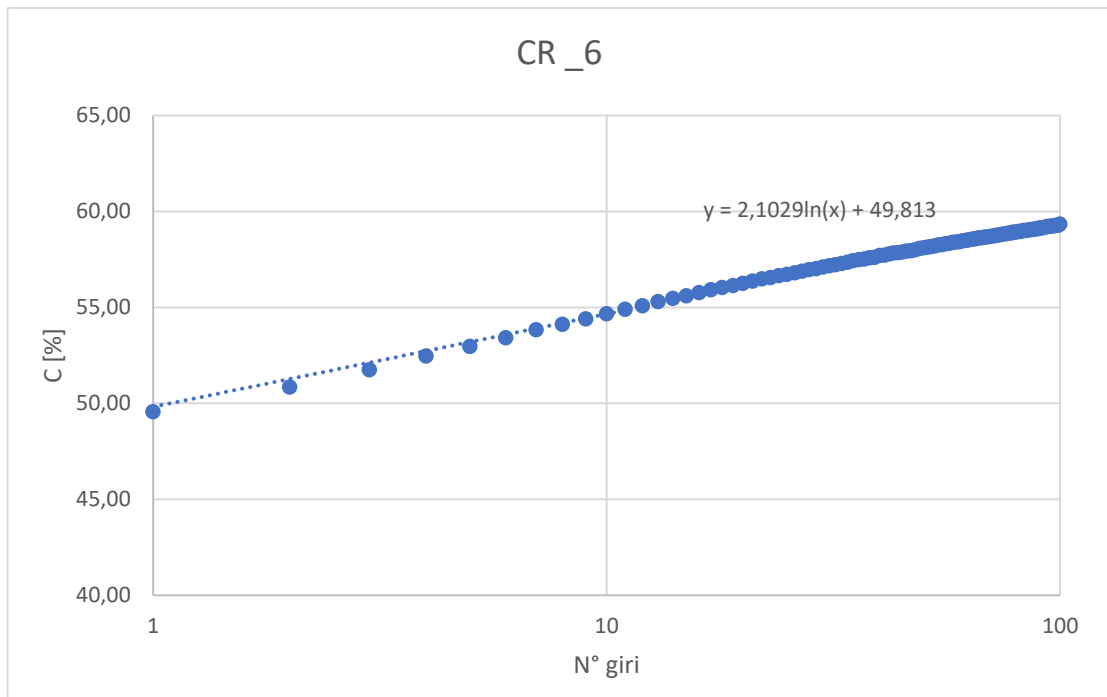


Figura 4.37 - Esempio di curva (n° giri; C) e relativa interpolazione con equazione della retta

L'intersezione tra l'asse delle ordinate e la retta, indicata come C_1 , rappresenta il grado di addensamento iniziale mentre la pendenza, indicata con k , rappresenta la lavorabilità, ovvero quanto viene compattato il materiale. Più è alta k più il materiale si compatta bene.

	C_1 [mm]	k [l]
1	50,641	2,0106
2	49,986	2,0763
3	50,64	2,0215
4	49,874	2,1043
5	49,983	2,09
6	49,813	2,1029
	50,156	2,068

Tabella 4.3 - Esempio di riepilogo dei coefficienti C_1 e k nei provini di un impasto

Vengono inoltre annotate le seguenti masse:

- Massa della fustella: $tara_1$
- Massa del disco di carta: $tara_2$
- Massa di fustella, disco e materiale PRE compattazione: m_1
- Massa di fustella, disco e materiale POST compattazione: m_2

4.1.5 Determinazione delle proprietà volumetriche

La composizione volumetrica delle miscele è una delle proprietà che maggiormente caratterizza il comportamento del conglomerato bituminoso in fase di esercizio. Le miscele sono costituite principalmente da tre elementi:

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

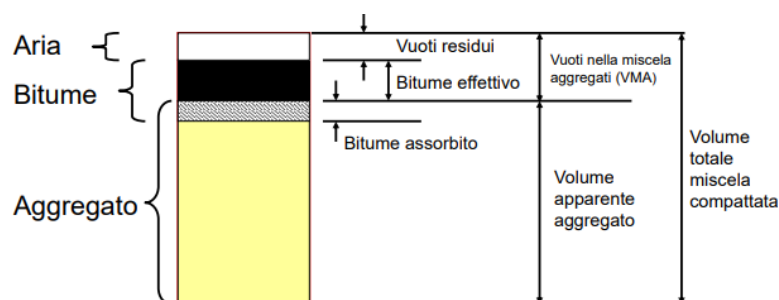


Figura 4.38 - Schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

In questo paragrafo si elencano i metodi per il calcolo volumetrico utilizzati in questa sperimentazione.

4.1.5.1 Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5)

Si definisce massa volumica massima la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una nota temperatura di prova. Nel presente elaborato la massa volumica massima ρ_m del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando un procedimento matematico conforme alla normativa UNI EN 12697-5, secondo cui:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

dove:

- ρ_m : massa volumica massima della miscela in kg/m³;
- p_a : percentuale di aggregati nella miscela in m/m;
- ρ_a : massa volumica apparente degli aggregati in kg/m³;
- p_b : percentuale di legante nella miscela in m/m;

- ρ_b : massa volumica del legante a 25 °C in kg/m³.

4.1.5.2 Determinazione della massa volumica apparente (UNI EN 12697-6)

La massa volumica apparente è la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, del provino ad una nota temperatura di prova. Nel presente elaborato la massa volumica apparente ρ_b del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando la procedura D (procedura geometrica) in accordo con la normativa UNI EN 12697-6.

La procedura D prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco (m_1). La massa volumica geometrica (ρ_{bgeom}) per provini cilindrici si calcola come segue:

$$\rho_{bgeom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^6$$

dove:

- ρ_b : massa volumica apparente del provino in kg/m³;
- m_1 : massa del provino asciutto in g;
- h: altezza del provino in mm;
- d: diametro del provino in mm.

4.1.5.3 Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)

Le proprietà volumetriche delle miscele studiate nella presente indagine sono state determinate, in termini di contenuto di vuoti residui dei provini compattati, in accordo a quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8. Il volume dei vuoti si ricava utilizzando la massa volumica massima e la massa volumica apparente mediante la seguente formula:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100$$

4.1.6 Prova di Modulo a Trazione Indiretta (UNI EN 12697-26)

Per misurare il modulo di rigidezza a trazione indiretta, in questa indagine, è stata impiegata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester), effettuando la prova ITSM. In linea generale essa consente di applicare un carico di compressione in una direzione e di misurare la deformazione, tramite dei trasduttori, nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico.



Figura 4.39 - Nottingham Asphalt Tester (NAT)

La determinazione del modulo di rigidezza con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata.

Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di $90^{\circ} \pm 2^{\circ}$).

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare in maniera automatica tutte le variabili che intervengono: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso $2 \mu\text{m}$) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson (in questo caso fissato a 0,3), la temperatura di prova.

Per fare in modo che il carico applicato sia conforme ai requisiti richiesti, la macchina possiede un sistema di gestione che, applicando al provino degli impulsi di condizionamento

preliminari, effettua una taratura. Gli impulsi di condizionamento servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione.

La prova si basa sull'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Ciò è possibile perché, sebbene il conglomerato bituminoso sia caratterizzato da un comportamento visco-elasto-plastico, alle condizioni di prova si comporta come un materiale elastico lineare, in particolare per temperature al di sotto dei 25°C il modulo di rigidezza a trazione è uguale a quello a compressione.

Nella prova di trazione indiretta ripetuta, la congruenza tra il modulo di rigidezza a compressione e trazione fa sì che il modulo del campione sia unico ed esclusivamente funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson.

Lo stato di sollecitazione in atto durante la prova è descritto dalla figura seguente:

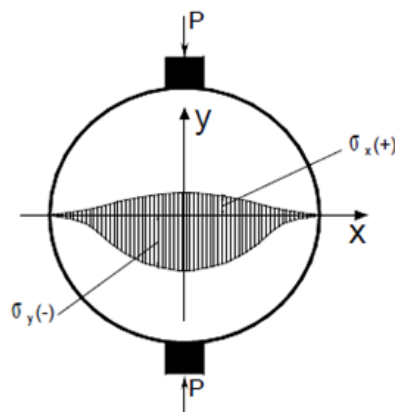


Figura 4.40 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

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

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

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

dove:

- P: carico applicato;

- d: diametro del campione;
- t: spessore del campione.

La determinazione del modulo di rigidezza elastico, in funzione di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni, può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale ε_x dell'elemento è:

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

dove:

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

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

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

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

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

La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a $0,60 \pm 0,10$, viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

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

dove:

- E' è il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;

- k è il rapporto tra le aree;
- E è il modulo di rigidezza in MPa.

Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $5,0 \pm 0,2$ μm .

Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- *Temperatura*: come affermato precedentemente, affinché sia valida la formula per il calcolo del modulo E , occorre che quest'ultimo risulti uguale sia a compressione che a trazione. Questa affermazione può essere considerata vera solo per temperature sotto i 25°C . In questo studio le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di 20°C ;
- *Rise-time (tempo di picco)*: a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In particolare, il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante per raggiungere il valore massimo.

Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidezza del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale).

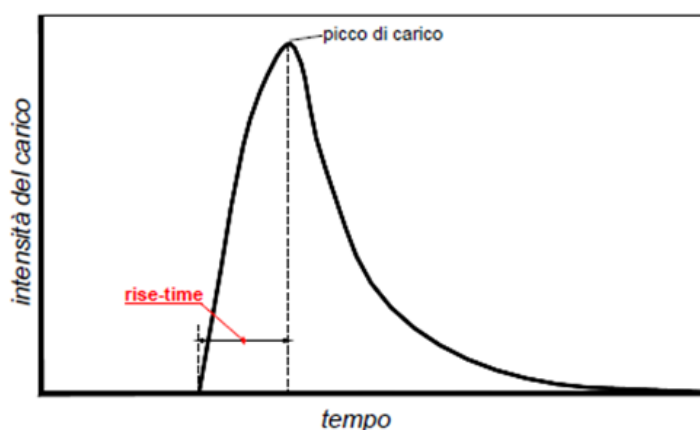


Figura 4.41 - Rappresentazione del rise-time di un impulso di carico

La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot r_i}$$

In questa campagna sperimentale il rise-time è stato mantenuto costante e pari a 124 ms.

- *Deformazione orizzontale imposta:* a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 2 μm ;
- *Numero di colpi di condizionamento iniziale:* si è già visto come, attraverso un sistema di gestione ed acquisizione dati, sia possibile operare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Tali impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione. Per ottenere valori di rigidezza affidabili è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente. Pertanto, nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento.

Il NAT è posizionato all'interno di una camera climatica che permette il mantenimento di una temperatura costante all'interno pari a 20°. La misurazione della temperatura all'interno della camera avviene tramite un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina.

Il NAT è dotato di una cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 kN a cui subito sotto è collegato il pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino. Tale cella di carico è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati.



Figura 4.42 - Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

La misurazione della deformazione nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico avviene tramite dei trasduttori che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione l'entità dello spostamento. Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti, che vanno a comporre il *castelletto*.

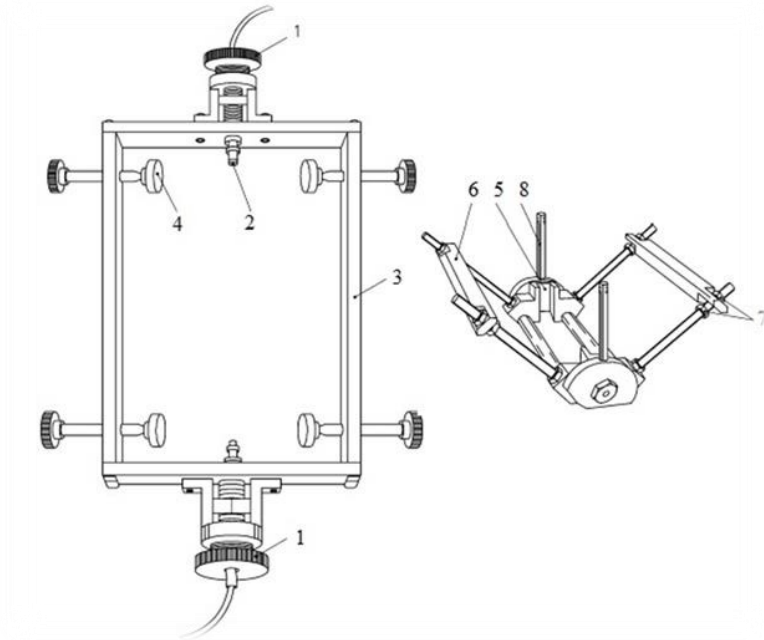


Figura 4.43 - Componenti del castelletto

Il provino viene posizionato all'interno del telaio, indicato col numero 3; viene centrato, seguendo la guida indicata col numero 5; e successivamente fissato, grazie alle viti indicate col numero 4. A questo punto i trasduttori, indicati nella figura precedente con il numero 2, vengono inseriti nei due fori e spinti verso il provino fino ad arrivare a fondo corsa. Le viti indicate col numero 1 permettono di mettere in posizione corretta i trasduttori; nello specifico permettono di regolare la corsa del trasduttore che deve essere a circa metà.

Prima di inserire il provino nel telaio bisogna posizionare quest'ultimo sulle barre indicate col numero 6. Le barre devono essere regolate, attraverso le viti indicate col numero 7, affinché il telaio posto superiormente sia in bolla sul piano orizzontale.

Una volta montato il provino sul castelletto, viene posta superiormente una testa di carico.

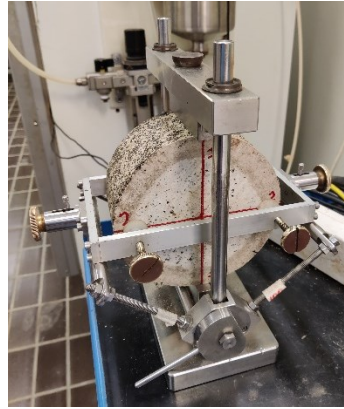


Figura 4.44 - Provino montato sul castelletto e testa di carico applicata



Figura 4.45 - Provino posizionato nella macchina e trasduttori montati

Tra i vari dati in input della prova, bisogna inserire il diametro e l'altezza media del provino. La seconda viene ricavata come media di quattro misurazioni effettuate, mediante un calibro con una precisione non inferiore a 0,1 mm, in quattro punti diversi del provino, rilevati nelle 2 diagonali principali.

In accordo alla norma UNI EN 12697-26, i provini da testare devono essere condizionati termicamente alla temperatura di prova desiderata, in tale sperimentazione la temperatura è stata impostata a 20°C, per un tempo sufficiente a raggiungere tale temperatura anche all'interno del provino con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4 °C.

Di seguito viene illustrato il software utilizzato per la prova di modulo a trazione indiretta.

The screenshot shows a software window titled 'itsm3' with a list of input parameters for a test. Each parameter is displayed in a cyan bar with a numerical value and up/down arrow controls. 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 for 'Cooper Research Technology Limited' and two buttons: 'Exit' and 'Continue'.

Figura 4.46 - Schermata iniziale del software ITSM con dati input

La prima fase di prova consiste quindi nell'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software. Come si può notare dalla figura precedente vanno inseriti i seguenti parametri:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova (20°C);
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test (150 mm);
- Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
- Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto, nel caso di conglomerati riciclati a freddo, pari a 0,30;
- Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata (124 ms);
- Target horizontal Deformation [μm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino (2 μm);
- Number of Conditioning Pulses: numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 2 μm (10).

Nella finestra più piccola in alto a destra va invece inserita la denominazione del provino, cioè il nome di riferimento che comparirà nel rapporto finale.

Dopo aver inserito i dati appena elencati si passa alla schermata visualizzata in Figura 4.47, dove vanno inseriti i dati del provino riguardanti la data di effettuazione del test, l'addetto che lo esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. Questi dati sono utili solo alla stesura del rapporto di prova.

Enter the details that need to be stored and printed on the test report

Serial No. of this test report	Date of issue of report
0833-01	25.01.2018
Name of client	
Viateco 5582	
Name of person responsible for this report	
J Anthony	
Type and origin of bituminous mixture	
N/A	
Method of manufacture of the bituminous mixture	
N/A	
Method of compaction	
N/A	
Bulk density determination method	
N/A	
Specimen storage details	
N/A	

Bulk density

Bulk density in kg/m³

2540

OK

Cancel

Exit Continue

Cooper Research Technology Limited

Figura 4.47 - Seconda Schermata

La schermata successiva a cui si arriva è quella di figura 4.48. Essa è utile al controllo del pistone pneumatico; infatti, una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico.

Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante *Make Contact*. Infatti, il pistone si porta a contatto applicando sul provino una forza di pre-carico pari a circa 30 N.

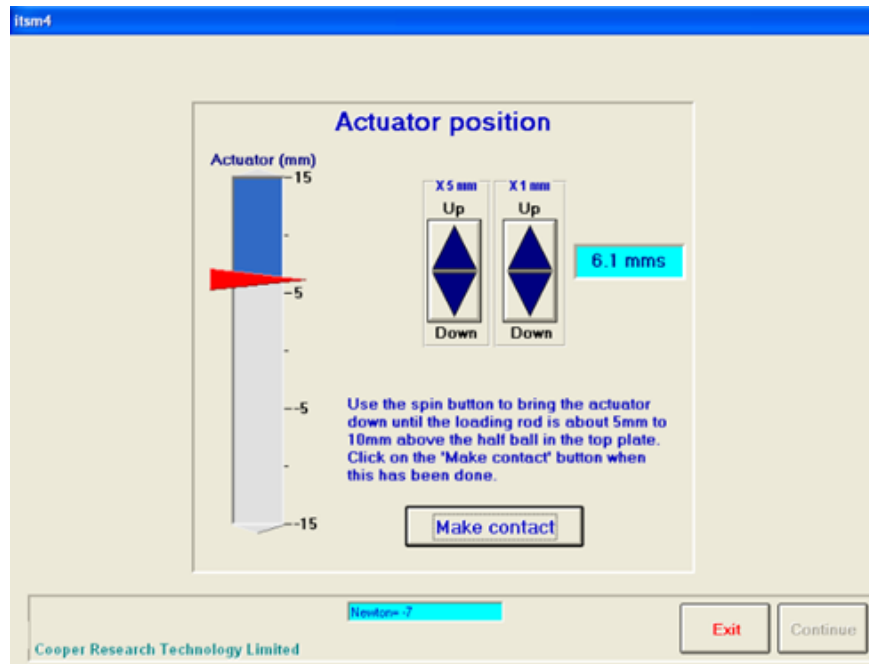


Figura 4.48 - Schermata con il comando "Make contact"

Successivamente viene visualizzata la schermata di Figura 4.49, utile al controllo dei trasduttori. Essi, infatti, vanno regolati finché le due frecce diventano rosse come in Figura 4.50, a quel punto significa che i trasduttori sono in grado di misurare correttamente la deformazione, praticamente sono regolati a metà corsa. Se i trasduttori non fossero così regolati, la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino. Questo porta ad una errata applicazione del carico, in quanto si avrebbe un'auto-calibrazione errata e quindi il risultato del test verrebbe falsato.

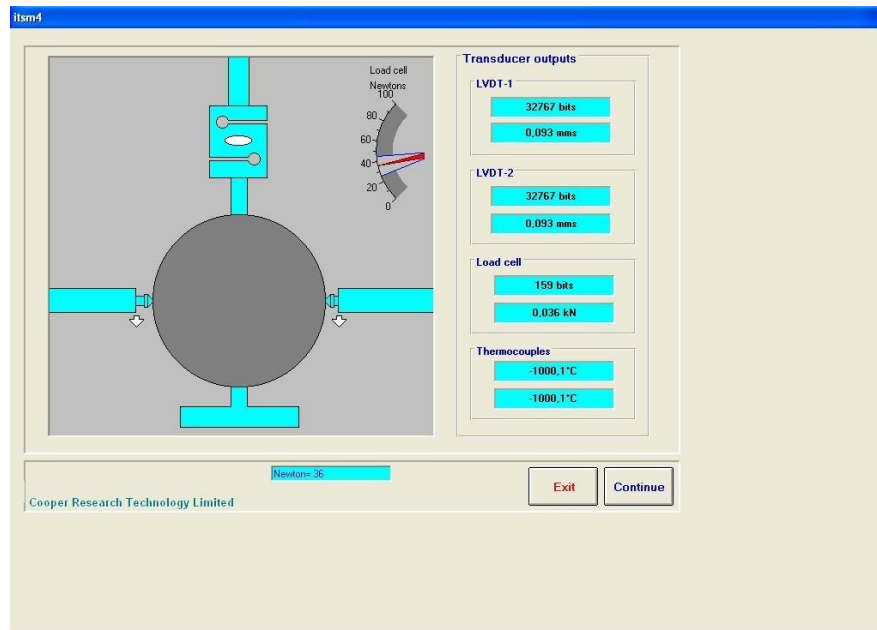


Figura 4.49 - Schermata prima della regolazione dei trasduttori

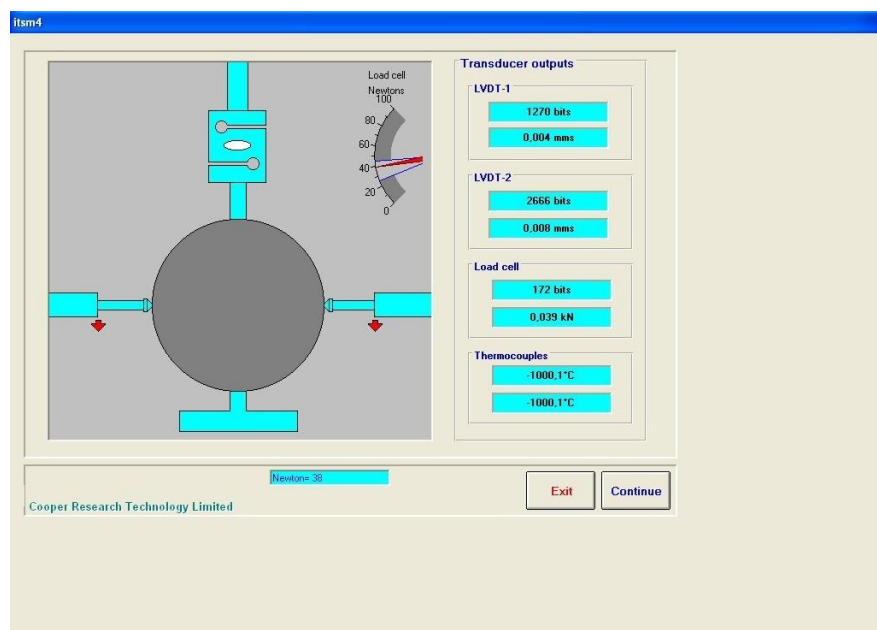


Figura 4.50 - Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

Una volta che i trasduttori sono in posizione corretta, va controllata la temperatura presente all'interno della camera climatica del NAT al cui interno è posizionata tutta l'apparecchiatura con il provino montato su essa. In particolare, tale temperatura non dovrà essere differente da quella di prova di un valore ± 0.5 °C. Una volta sicuri che anche la temperatura è corretta si prosegue il test. A questo punto si passa alla schermata visualizzata in figura 4.51. Qui vengono riportati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di pre-carico.

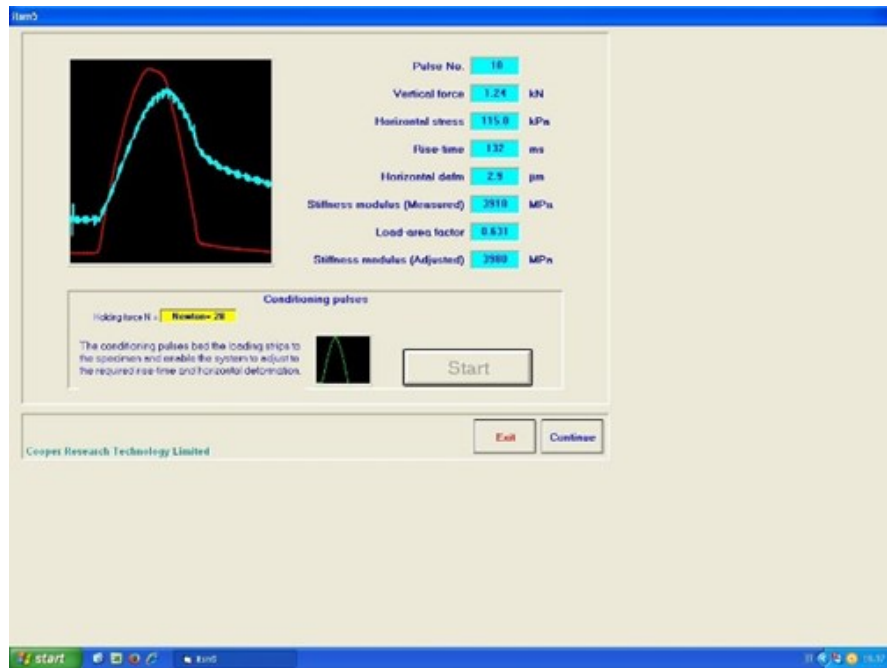


Figura 4.51 - Schermata degli impulsi pre-carico

Infine, si visualizzano i risultati come in figura 4.52. In questa schermata finale si visualizzano i 5 impulsi di prova e ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro.



Figura 4.52 - Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Successivamente il software richiede che il provino venga ruotato di un angolo pari a ($90^\circ \pm 10^\circ$) e si ripete la prova per l'altra diagonale effettuando gli stessi passaggi descritti. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%.

Il modulo definitivo si ottiene come media di quelli misurati sui due diametri.

4.1.7 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova Brasiliana, consiste nel comprimere, fino a rottura, un provino lungo una diagonale. La rottura nel materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson).

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. In questa indagine, e di norma, la prova è effettuata alla temperatura di 25°C. Infatti, prima della realizzazione della prova, i provini vengono condizionati per 4 ore nella camera climatica a 25°C.



Figura 4.53 - Camera climatica a 25°C

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito, verso la testa di carico superiore. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli di dimensioni standardizzate.

Il provino viene collocato, ben centrato, tra i piatti della pressa, in maniera tale che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino (Figura 4.54).

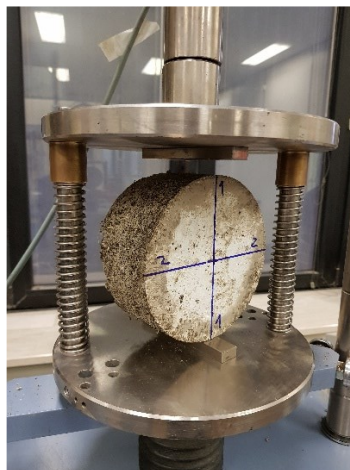


Figura 4.54 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

Durante la prova la testa di carico inferiore viene fatta avanzare verso l'alto ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subita dal provino durante l'applicazione del carico, sia il carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta a deformazione controllata.

In Figura 4.55 si trova invece un provino rotto al termine della prova Brasiliana.



Figura 4.55 - Provino rotto dopo la prova

La macchina di prova può essere guidata mediante il pannello di controllo, posto sotto il sistema di carico, oppure in remoto con un computer tramite il software UTM II. Nel controllo

in remoto, si impostano parametri di prova (i principali sono diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova) e si ottengono in output:

- Curva carico-corsa (carico-deformazione verticale), visualizzabile già durante l'esecuzione del test, e i relativi punti che formano tale curva;
- Carico di rottura a compressione;
- Deformazione a compressione.

Si può chiedere al software di fornire già calcolato anche il valore della resistenza a trazione indiretta ITS. Nelle figure seguenti si possono vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II.

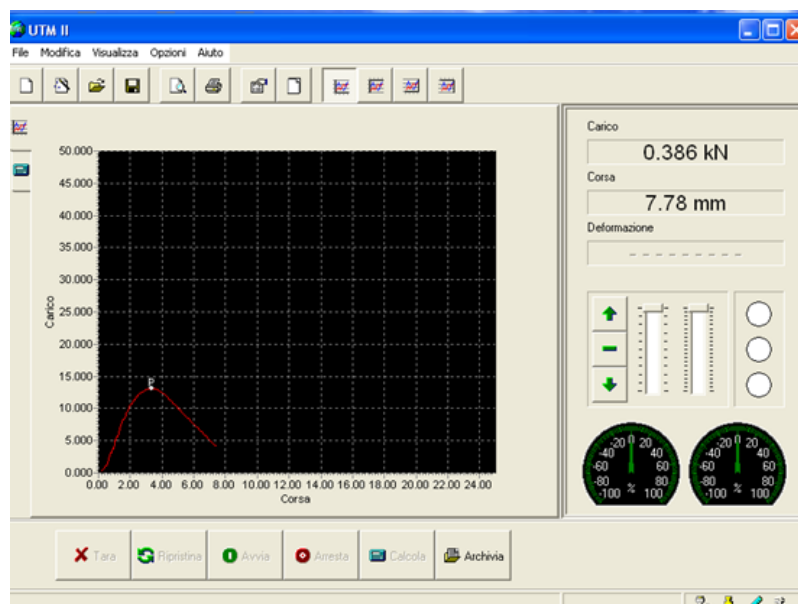


Figura 4.56 - Curva sforzo-deformazione risultante dall'applicazione del carico assiale

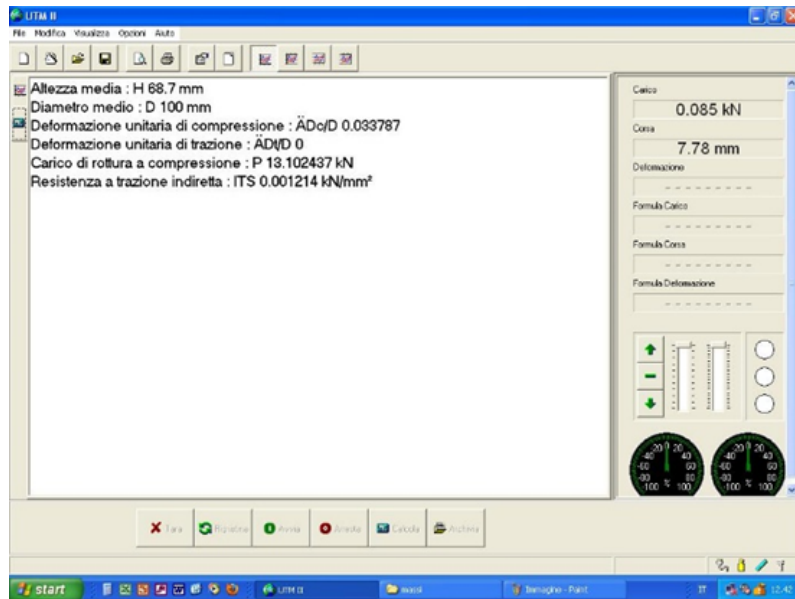


Figura 4.57 - Schermata con rielaborazione dei risultati

Viene calcolata la Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, a partire dal carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

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

dove:

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



Figura 4.58 - Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

4.1.7.1 Sensibilità all'acqua

Nel caso in cui si stia valutando la sensibilità all'acqua di un determinato materiale, sarà necessario comparare i dati di rottura di un provino "asciutto" con quelli di un provino "bagnato".

Questo tipo di verifica viene effettuata 14 giorni dopo il confezionamento dei provini. Prevede il posizionamento di:

- 3 provini a 25°C all'aria per 3 giorni più 4 ore sempre a 25°C
- 3 provini in bagno termostatico a 40°C per 3 giorni e poi 4 ore in bagno termostatico a 25°C

Dopo questo condizionamento si esegue la prova di trazione indiretta precedentemente descritta.

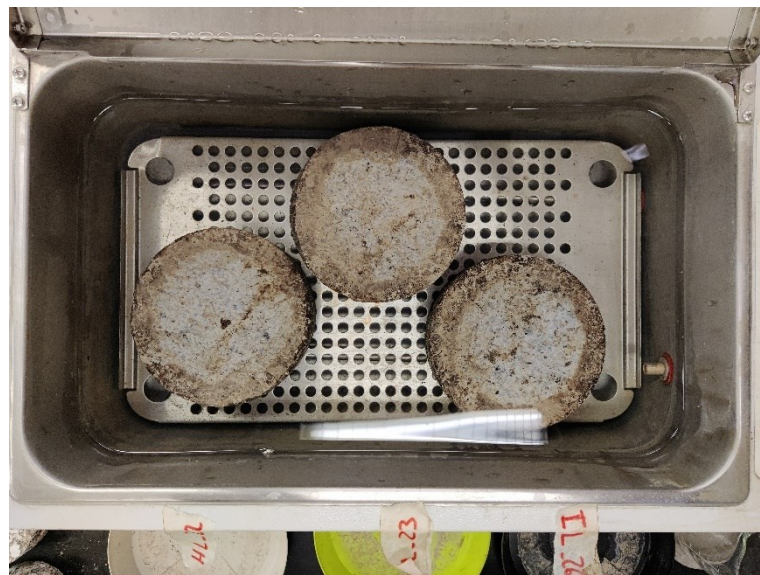


Figura 4.59 - Bagno termostatico

Viene calcolata la Resistenza a Trazione Indiretta ITS nel caso bagnato, quindi ITS wet.

Noto ITS wet si può calcolare $ITSr$, ITS ratio, ovvero il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta del provino condizionato in acqua e quella del provino condizionato in aria, con la seguente formula:

$$ITSr = \frac{ITS\ wet}{ITS\ dry} \cdot 100$$

4.1.7.2 Coefficiente CTI ed energie

In seguito alla prova di rottura, elaborando la curva restituita alla fine della prova, si possono ricavare il coefficiente di trazione indiretta (CTI) e le energie, totale, da inizio prova al picco e dal picco alla rottura del provino.

Il coefficiente CTI si può calcolare attraverso una formula che è la seguente:

$$\frac{\pi}{2} * \left(\frac{Y_m}{X_m} \right)$$

Dove:

Y_m = è il valore massimo, quindi al picco, sull'asse delle ordinate

X_m = è il valore sull'asse delle ascisse, corrispondente a Y_m

Le energie invece corrispondono all'aria sottesa dalla curva, e questa si può calcolare o ricavandosi l'equazione della curva, o attraverso un'integrazione per parti, trovando i vari esimi trapezi che formano l'area della curva e sommandoli:

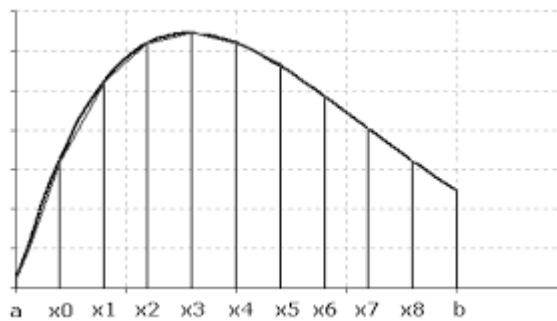


Figura 4.60 – Integrazione per parti

4.2 Programma Sperimentale

Lo scopo dell'analisi condotta riguarda lo studio delle caratteristiche meccaniche di diverse miscele preparate con e senza l'impiego di fibre. Lo studio si è sviluppato in due fasi: una prima fase di studio preliminare per determinare la miscela ottimale degli aggregati e una seconda fase in cui sono state realizzate tre miscele di riciclato a freddo con contenuto costante di fibre e tre miscele di riciclato a freddo senza fibre. Questa sperimentazione fa parte di una sperimentazione più grande in cui si sono fatte molte più miscele con altri componenti; tuttavia, l'analisi trattata in questa tesi si è concentrata sulle miscele sopra citate.

4.2.1 Fase preliminare

Il RAP prelevato in cantiere è stato inviato al Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria di Ancona sito in località Brece Bianche.

Sul RAP consegnato in laboratorio si è svolta una classificazione fisica effettuando prove di:

- Analisi granulometrica
- Picnometro per la valutazione della massa volumica

4.2.1.1 Classificazione del materiale

In questa fase preliminare sono stati prelevati 2 campioni di fresato e su questi è stata effettuata l'analisi granulometrica. Di seguito sono esposti i risultati:

Committente				
Campione	Perugia_1			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuti	% trattenuto	% passante
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	63,9	2,6	2,6	97,4
16	82,9	3,4	6,0	94,0
10	225,7	9,2	15,2	84,8
8	250,1	10,2	25,4	74,6
4	574,8	23,4	48,8	51,2
2	437,4	17,8	66,6	33,4
1	324,8	13,2	79,8	20,2
0,5	204,3	8,3	88,1	11,9
0,25	107,7	4,4	92,5	7,5
0,125	86,6	3,5	96,0	4,0
0,063	31,5	1,3	97,3	2,7
FONDO	69,2	2,8	100,1	0

Figura 4.61 - Analisi granulometrica campione Perugia_1

Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	110	4,3	4,3	95,7
16	104,3	4,1	8,4	91,6
10	232,4	9,1	17,5	82,5
8	206,6	8,1	25,6	74,4
4	557,8	21,9	47,5	52,5
2	451,4	17,8	65,3	34,7
1	357,4	14,1	79,4	20,6
0,5	211,8	8,3	87,7	12,3
0,25	114,1	4,5	92,2	7,8
0,125	93,1	3,7	95,9	4,1
0,063	36	1,4	97,3	2,7
FONDO	67,7	2,7	100,0	0

Figura 4.62 - Analisi granulometrica campione Perugia_2

Sono state disegnate le varie curve granulometriche:

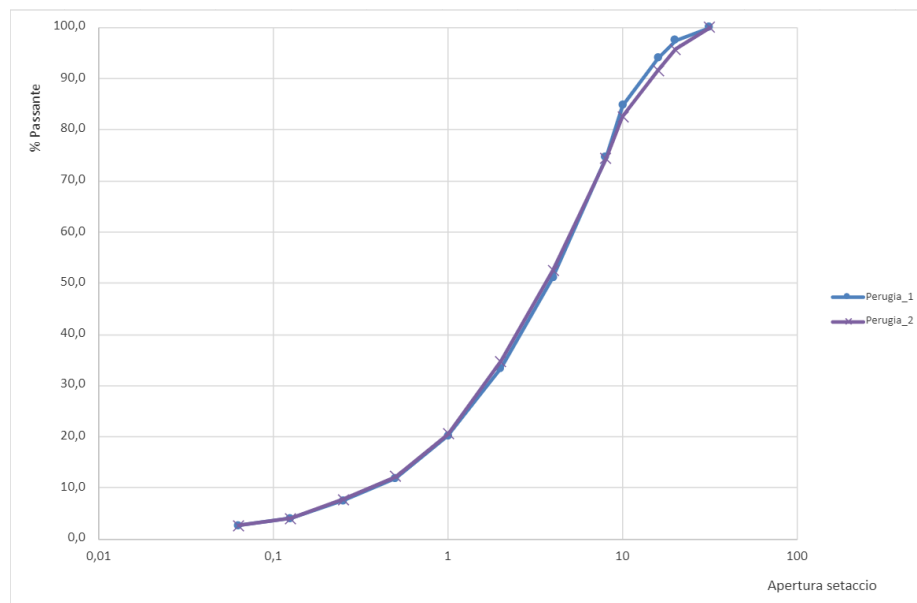


Figura 4.63 - Curve granulometriche campioni Perugia 1 e 2

Come si può vedere dal precedente confronto tra le curve granulometriche, si può notare che i due campioni di RAP sono granulometricamente simili. Per questo motivo è possibile calcolare un'unica curva granulometrica rappresentativa, come media dei passanti delle varie curve:

	PERUGIA 1	PERUGIA 2	MEDIA
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0
20	97,4	95,7	96,6
16	94,0	91,6	92,8
10	84,8	82,5	83,7
8	74,6	74,4	74,5
4	51,2	52,5	51,9
2	33,4	34,7	34,1
1	20,2	20,6	20,4
0,5	11,9	12,3	12,1
0,25	7,5	7,8	7,7
0,125	4,0	4,1	4,1
0,063	2,7	2,7	2,7
FONDO	0	0	0

Figura 4.64 - Riepilogo analisi granulometriche e calcolo della curva granulometrica media

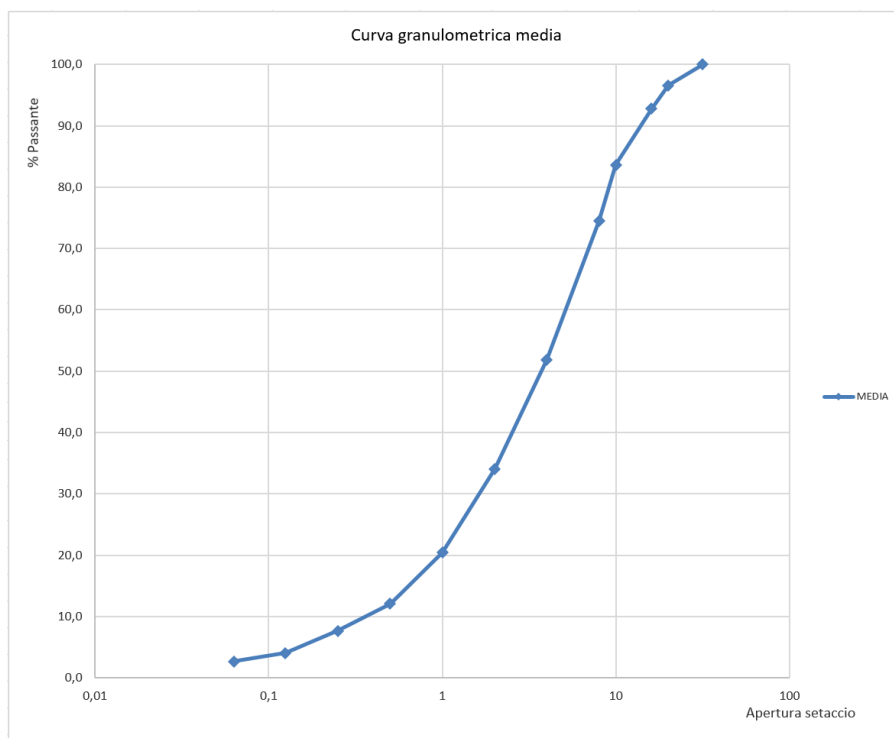


Figura 4.65 - Curva granulometrica media

Nota la curva granulometrica rappresentativa, si è andati a confrontarla con le curve di massimo addensamento di Fuller a vari Dmax:

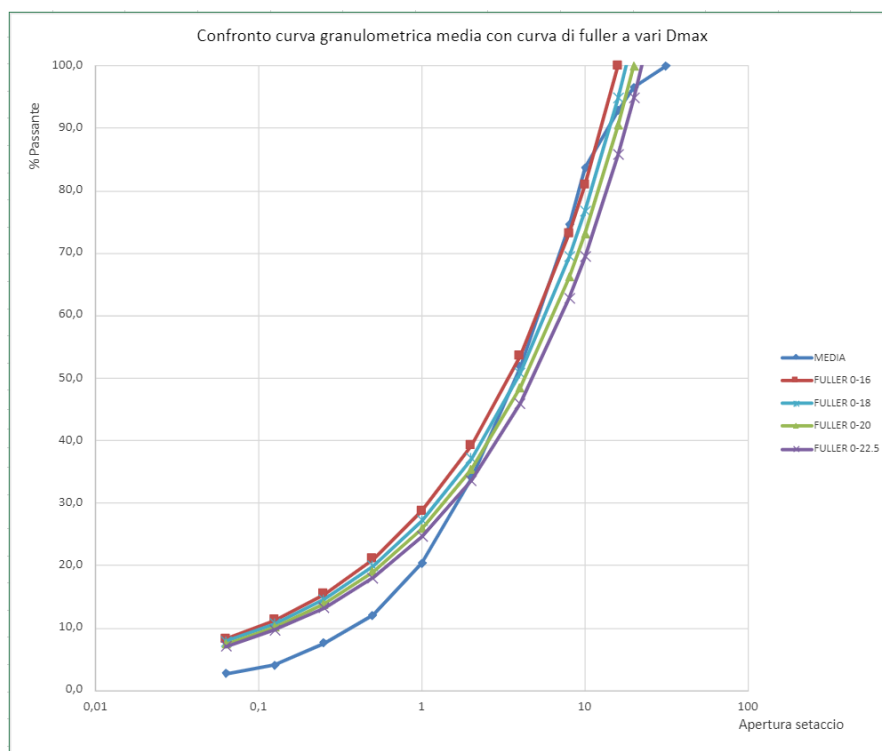


Figura 4.66 - Confronto curva granulometrica media con curve di Fuller a vari D_{max}

Si è scelto di adottare la curva di Fuller con $D_{max} = 20 \text{ mm}$ e quindi l'obiettivo è stato quello di modificare la granulometria del materiale in modo da avere una curva il più simile possibile a quella di Fuller con $D_{max} = 20 \text{ mm}$.

4.2.1.2 Elaborazione dei dati del picnometro

Attraverso un foglio di calcolo, sono stati inseriti i dati determinati durante l'esecuzione della prova del picnometro descritta nel Paragrafo 4.1.2, ovvero:

- M1: massa netta dell'aggregato in condizioni di superficie satura asciutta (SSA)
- M2: massa del picnometro + aggregato + acqua fino al menisco
- M3: massa del picnometro pieno d'acqua (la temperatura dell'acqua non deve differire di 2°C da T1)
- M4: massa netta dell'aggregato asciutto post essiccazione nel forno
- Mdry: massa lorda letta sulla bilancia degli aggregati in condizione asciutta post essiccazione nel forno
- Mssa: massa lorda letta sulla bilancia degli aggregati in condizione di superficie satura
- T1: temperatura dell'acqua in corrispondenza della pesata per M2 (22°C±3°C)
- tara1: tara della teglia di alluminio (per aggregati fini è la somma di: teglia + spatola + cono + pistone)
- ρ_w : massa volumica dell'acqua a T1

Da cui poi si è stati in grado di calcolare:

- ρ_a : massa volumica apparente dei granuli
- ρ_{rd} : massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa
- ρ_{ssd} : massa volumica dei granuli in condizione SSA
- WA_{24} : Assorbimento dell'acqua

Di seguito vengono riportati i risultati:

- RAP Perugia_1 grosso (4 – 31,5 mm)

M1 [g]	949,3	T1	25	ρ_A [g/cm ³]	2,595683
M2 [g]	4374,8	Tinf	25	ρ_{RD} [g/cm ³]	2,49155
M3 [g]	3799,4	ρ_{winf} [g/cm ³]	997,1	ρ_{SSD} [g/cm ³]	2,531551
M4 [g]	934,3	Tsup	25	WA24	1,60548
T1 [°C]	25	ρ_{wsup} [g/cm ³]	997,1		
ρ_w [g/cm ³]	0,9971	ρ_w [g/cm ³]	997,10		
tara1 [g]	715,9				
Mssa [g]	1665,2				
Mdry [g]	1650,2				

Tabella 4.4 - Elaborazione picnometro pezzatura grossa campione Perugia_1

- RAP Perugia_1 fino (0,063 – 4 mm)

M1 [g]	527,3	T1	23,5	ρ_A [g/cm ³]	2,462049
M2 [g]	3552,9	Tinf	23	ρ_{RD} [g/cm ³]	2,258248
M3 [g]	3250,3	ρ_{winf} [g/cm ³]	997,6	ρ_{SSD} [g/cm ³]	2,340818
M4 [g]	508,7	Tsup	24	WA24	3,656379
T1 [°C]	23,5	ρ_{wsup} [g/cm ³]	997,4		
ρ_w [g/cm ³]	0,9975	ρ_w [g/cm ³]	997,50		
tara1 [g]	879,7				
Mssa [g]	527,3				
Mdry [g]	508,7				

Tabella 4.5 - Elaborazione picnometro pezzatura fina campione Perugia_1

- RAP Perugia_2 grosso (4 – 31,5 mm)

M1 [g]	913,7	T1	22	ρ_A [g/cm ³]	2,604838
M2 [g]	4356,5	Tinf	22	ρ_{RD} [g/cm ³]	2,526678
M3 [g]	3799,4	ρ_{winf} [g/cm ³]	997,8	ρ_{SSD} [g/cm ³]	2,556618
M4 [g]	903	Tsup	22	WA24	1,184939
T1 [°C]	22	ρ_{wsup} [g/cm ³]	997,8		
ρ_w [g/cm ³]	0,9978	ρ_w [g/cm ³]	997,80		
tara1 [g]	715,9				
Mssa [g]	1629,6				
Mdry [g]	1618,9				

Tabella 4.6 - Elaborazione picnometro pezzatura grossa campione Perugia_2

- RAP gruppo FRESA grosso (0,063 – 4 mm)

M1 [g]	519,8
M2 [g]	3552,9
M3 [g]	3250,3
M4 [g]	506,7
T1 [°C]	22,8
ρ_w [g/cm3]	0,99834
tara1 [g]	908,7
Mssa [g]	519,8
Mdry [g]	506,7

T1	22,8
Tinf	22
$\rho_{w\text{inf}}$ [g/cm3]	998,5
Tsup	23
$\rho_{w\text{sup}}$ [g/cm3]	998,3
ρ_w [g/cm3]	998,34

ρ_A [g/cm3]	2,478485
ρ_{RD} [g/cm3]	2,329
ρ_{SSD} [g/cm3]	2,389213
WA24	2,585356

Tabella 4.7 - Elaborazione picnometro pezzatura fina campione Perugia_2

4.2.1.3 Miscele di prova

Per avere un materiale con una curva simile a quella di Fuller con $D_{max} = 20 \text{ mm}$ si è proceduto al "taglio" del materiale a 20 mm, ovvero una vagliatura in cui tutti i granuli con dimensione maggiore di 20 mm vengono scartati, in modo da aumentare la pendenza della curva blu (curva della media), nella figura precedente (fig. 4.65) , all'estremità destra.

Per la correzione alle basse dimensioni si è invece proceduto all'integrazione con materiali vergini, in particolare sono state valutate sei diverse miscele:

- MIX_fase 1
- MIX_fase 2
- MIX_fase 3
- MIX_fase 4
- MIX_fase 5
- MIX_fase 6

4.2.1.3.1 MIX_fase 1

La miscela MIX_fase 1 è composta da:

- RAP tal quale 0 – 20 mm in quantità pari al 94% in peso della miscela
- Filler di recupero in quantità pari al 4% in peso della miscela
- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela

Setaccio/crivello	MEDIA % passante	Fuller 0-20 % passante	Filler % passante	Cemento % passante	MIX_fase 1 % passante
31,5	100,0	100,0	100	100	100,0
20	100,0	100,0	100	100	100,0
16	96,1	90,4	100	100	96,3
10	86,6	73,2	100	100	87,4
8	77,2	66,2	100	100	78,5
4	53,7	48,5	100	100	56,5
2	35,3	35,5	100	100	39,1
1	21,1	26,0	100	100	25,8
0,5	12,5	19,0	100	100	17,8
0,25	7,9	13,9	98,6	100	13,4
0,125	4,2	10,2	90,2	100	9,6
0,063	2,8	7,5	77,6	100	7,7
FONDO	0,0	0	0	0	0,0

Figura 4.67 - Granulometrie componenti miscela MIX_fase 1

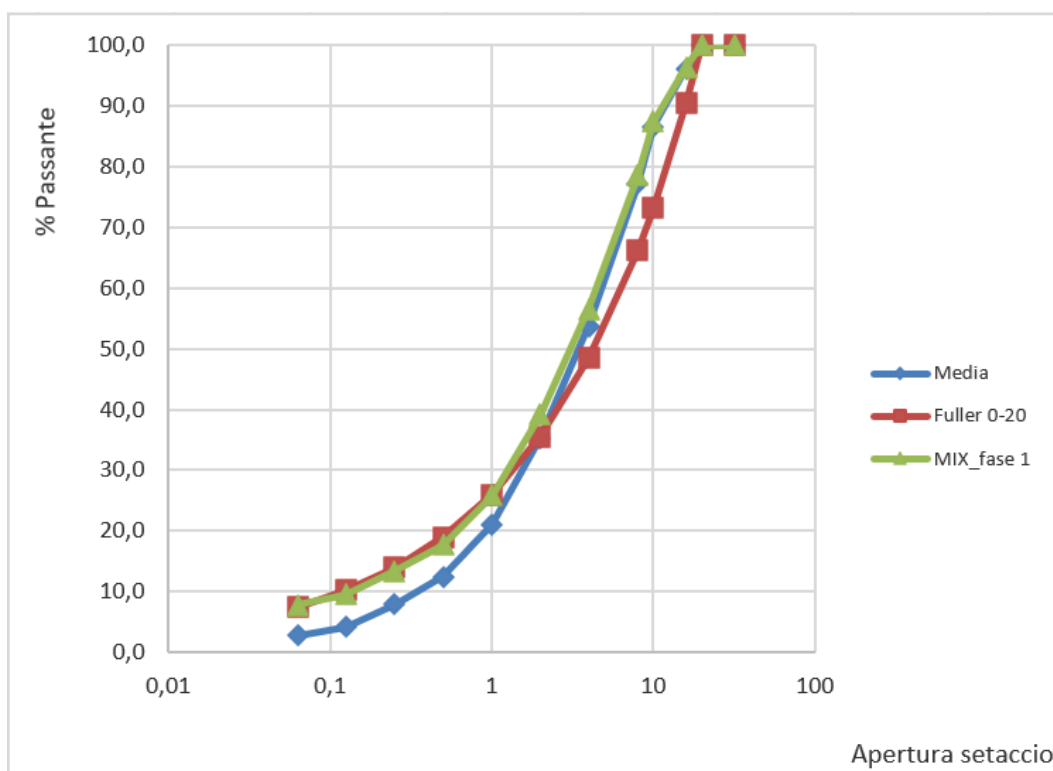


Figura 4.68 - Curve granulometriche MIX_fase 1

4.2.1.3.2 MIX_fase 2

La miscela MIX_fase 2 è composta da:

- RAP tal quale 0 – 20 mm in quantità pari al 93,8% in peso della miscela
- Filler di recupero in quantità pari al 4,2% in peso della miscela
- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela

	MEDIA	Fuller 0-20	Filler	Cemento	MIX_fase 2
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100	100	100,0
20	100,0	100,0	100	100	100,0
16	96,1	90,4	100	100	96,3
10	86,6	73,2	100	100	87,4
8	77,2	66,2	100	100	78,6
4	53,7	48,5	100	100	56,6
2	35,3	35,5	100	100	39,2
1	21,1	26,0	100	100	26,0
0,5	12,5	19,0	100	100	17,9
0,25	7,9	13,9	98,6	100	13,5
0,125	4,2	10,2	90,2	100	9,7
0,063	2,8	7,5	77,6	100	7,9
FONDO	0	0	0	0	0,0

Figura 4.69 - Granulometrie componenti miscela MIX_fase 2

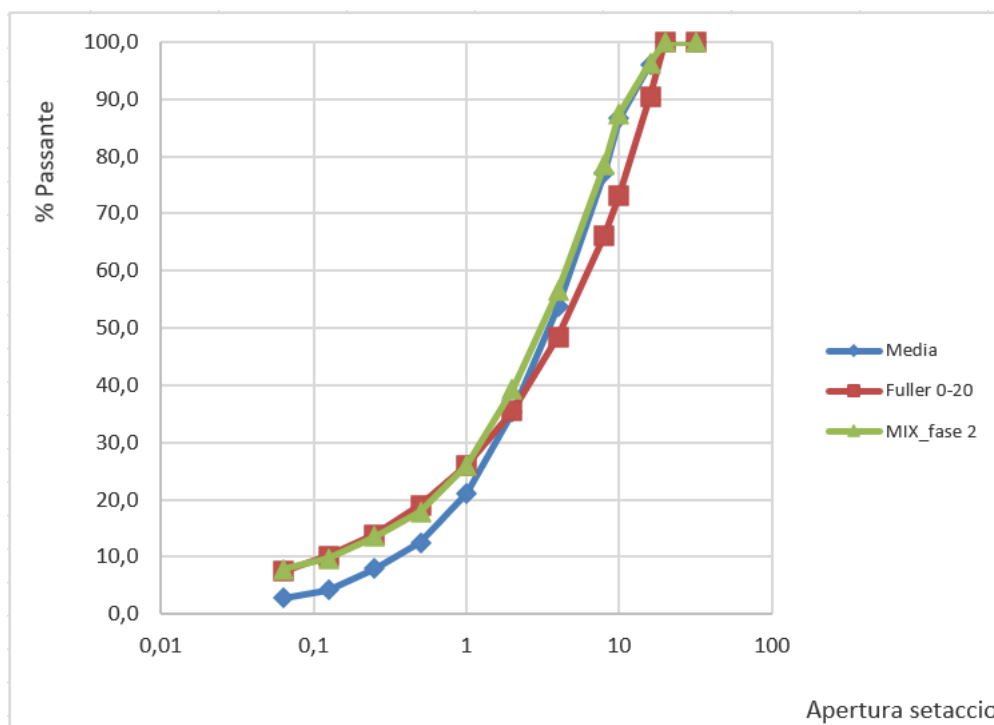


Figura 4.70 - Curve granulometriche MIX_fase 2

4.2.1.3.3 MIX_fase 3

La miscela MIX_fase 3 è composta da:

- RAP in frazione fina 0 - 1 mm in quantità pari al 20% in peso della miscela
- RAP in frazione grossa 1-20 mm in quantità pari al 74% in peso della miscela
- Filler di recupero in quantità pari al 4% in peso della miscela
- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela

	MEDIA	Fuller 0-20	Fino_0-1	Grosso_1-20	Filler	Cemento	MIX_fase 3
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0
16	96,1	90,4	100,0	95,1	100	100	96,4
10	86,6	73,2	100,0	83,1	100	100	87,5
8	77,2	66,2	100,0	71,1	100	100	78,6
4	53,7	48,5	100,0	41,3	100	100	56,5
2	35,3	35,5	100,0	17,9	100	100	39,2
1	21,1	26,0	100,0	0,0	100	100	26,0
0,5	12,5	19,0	59,3	0,0	100	100	17,8
0,25	7,9	13,9	37,6	0,0	98,6	100	13,5
0,125	4,2	10,2	20,0	0,0	90,2	100	9,6
0,063	2,8	7,5	13,4	0,0	77,6	100	7,8
FONDO	0	0	0	0,0	0	0	0

Figura 4.71 - Granulometrie componenti miscela MIX_fase 3

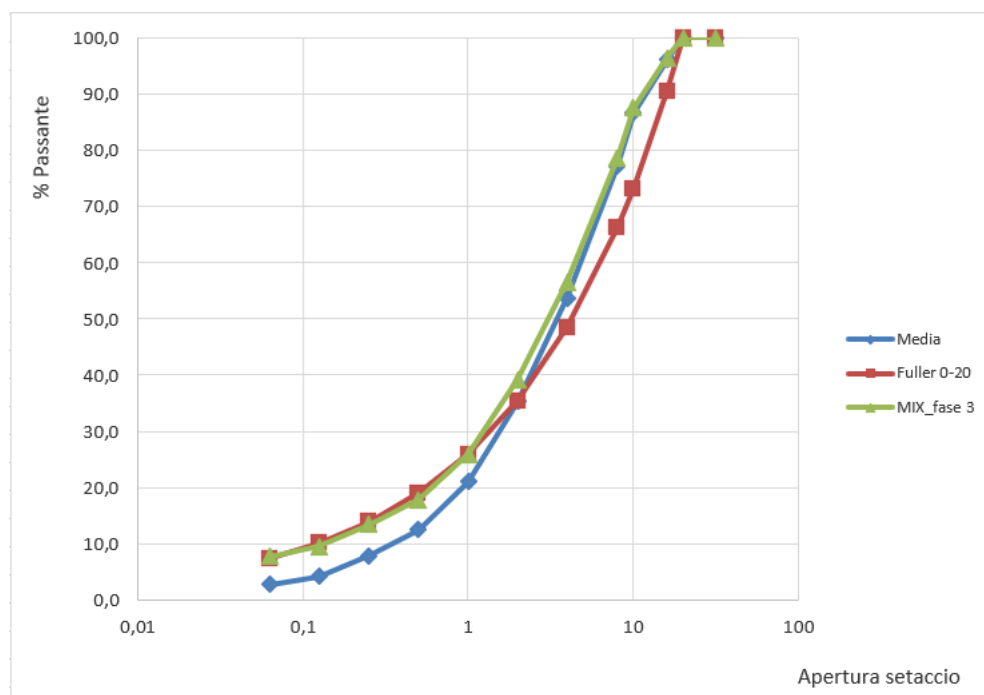


Figura 4.72 - Curve granulometriche MIX_fase 3

4.2.1.3.4 MIX_fase 4

La miscela MIX_fase 4 è composta da:

- RAP in frazione fina 0 - 1 mm in quantità pari al 19% in peso della miscela
- RAP in frazione media 1 - 8 mm in quantità pari al 40% in peso della miscela
- RAP in frazione grossa 8-20 mm in quantità pari al 35% in peso della miscela
- Filler di recupero in quantità pari al 4% in peso della miscela

- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela

	MEDIA	Fuller 0-20	Fino 0-1	Medio 1-8	Grosso 8-20	Filler	Cemento	MIX_fase 4
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100,0
16	96,1	90,4	100,0	100,0	83,0	100	100	94,1
10	86,6	73,2	100,0	100,0	41,4	100	100	79,5
8	77,2	66,2	100,0	100,0	0,0	100	100	65,0
4	53,7	48,5	100,0	58,1	0,0	100	100	48,2
2	35,3	35,5	100,0	25,2	0,0	100	100	35,1
1	21,1	26,0	100,0	0,0	0,0	100	100	25,0
0,5	12,5	19,0	59,3	0,0	0,0	100	100	17,3
0,25	7,9	13,9	37,6	0,0	0,0	98,6	100	13,1
0,125	4,2	10,2	20,0	0,0	0,0	90,2	100	9,4
0,063	2,8	7,5	13,4	0,0	0,0	77,6	100	7,7
FONDO	0	0	0	0	0,0	0	0	0,0

Figura 4.73 - Granulometrie componenti miscela MIX_fase 4

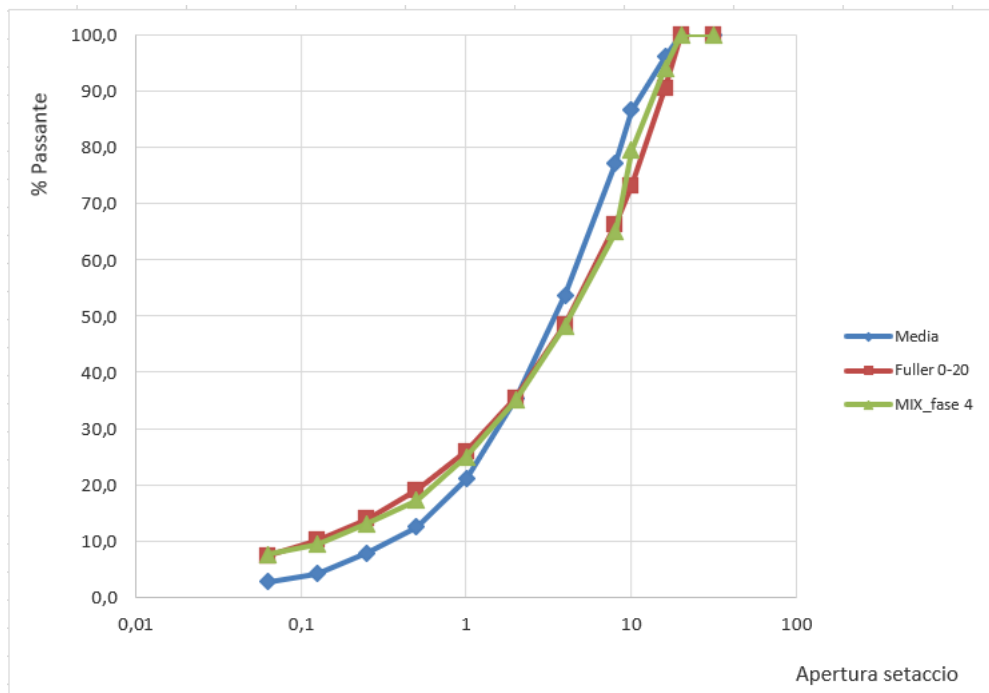


Figura 4.74 - Curve granulometriche MIX_fase 4

4.2.1.3.5 MIX_fase 5

La miscela MIX_fase 5 è composta da:

- RAP in frazione fina 0 - 4 mm in quantità pari al 36% in peso della miscela
- RAP in frazione grossa 4-20 mm in quantità pari al 52% in peso della miscela
- Filler di recupero in quantità pari al 4% in peso della miscela
- Sabbia calcarea 0-6 mm in quantità pari al 6% in peso della miscela
- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela

	MEDIA	Fuller 0-20	Fino_0-4	Grosso_4-20	Filler	Sabbia (0-6)	Cemento	MIX_fase 5
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	95,3	100	100	100	97,6
16	96,1	90,4	100,0	87,3	100	100	100	93,4
10	86,6	73,2	100,0	67,8	100	100	100	83,3
8	77,2	66,2	100,0	48,3	100	100	100	73,1
4	53,7	48,5	100,0	0,0	100	98,3	100	47,9
2	35,3	35,5	65,7	0,0	100	73,7	100	34,1
1	21,1	26,0	39,4	0,0	100	44,5	100	22,9
0,5	12,5	19,0	23,4	0,0	100	28,4	100	16,1
0,25	7,9	13,9	14,8	0,0	98,6	22,9	100	12,6
0,125	4,2	10,2	7,9	0,0	90,2	16,3	100	9,4
0,063	2,8	7,5	5,3	0,0	77,6	12,2	100	7,7
FONDO	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0

Figura 4.75 - Granulometrie componenti miscela MIX_fase 5

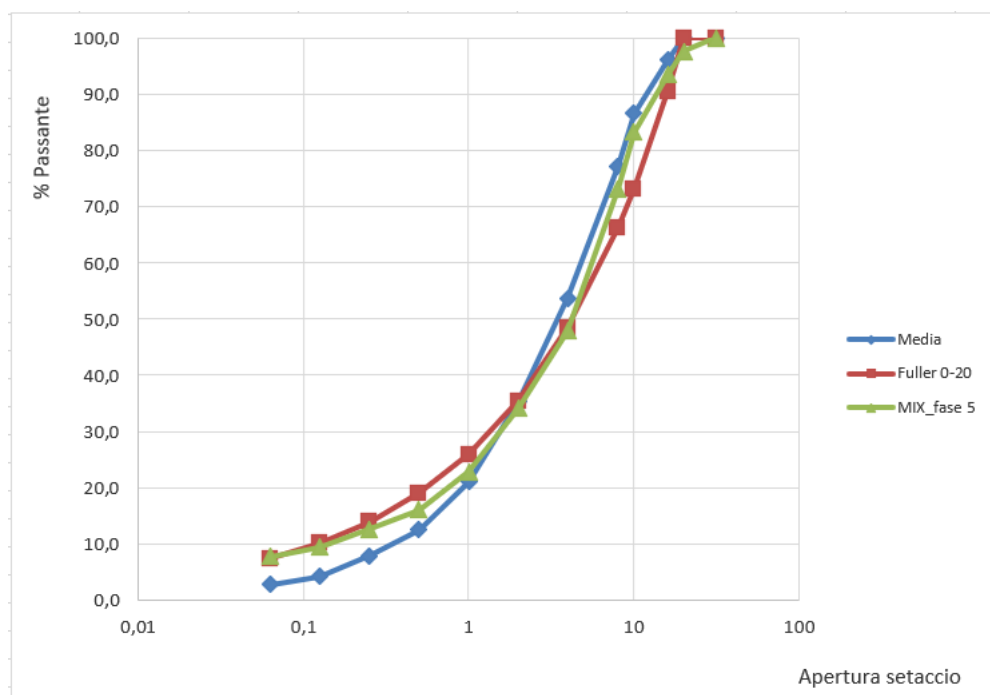


Figura 4.76 - Curve granulometriche MIX_fase 5

4.2.1.3.6 MIX_fase 6

La miscela MIX_fase 6 è composta da:

- RAP in frazione fina 0 - 4 mm in quantità pari al 33% in peso della miscela
- RAP in frazione grossa 4-20 mm in quantità pari al 47% in peso della miscela
- Filler di recupero in quantità pari al 4% in peso della miscela
- Sabbia calcarea 0-6 mm in quantità pari al 6% in peso della miscela
- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela

	MEDIA	Fuller 0-20	Fino 0-4	Grosso 4-20	Filler	Sabbia (0-6)	Cemento	MIX_fase 6
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	95,3	100	100	100	97,8
16	96,1	90,4	100,0	87,3	100	100	100	93,7
10	86,6	73,2	100,0	67,8	100	100	100	83,8
8	77,2	66,2	100,0	48,3	100	100	100	73,9
4	53,7	48,5	100,0	0,0	100	98,3	100	49,2
2	35,3	35,5	65,7	0,0	100	73,7	100	34,9
1	21,1	26,0	39,4	0,0	100	44,5	100	23,4
0,5	12,5	19,0	23,4	0,0	100	28,4	100	16,4
0,25	7,9	13,9	14,8	0,0	98,6	22,9	100	12,8
0,125	4,2	10,2	7,9	0,0	90,2	16,3	100	9,5
0,063	2,8	7,5	5,3	0,0	77,6	12,2	100	7,8
FONDO	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0

Figura 4.77 - Granulometrie componenti miscela MIX_fase 6

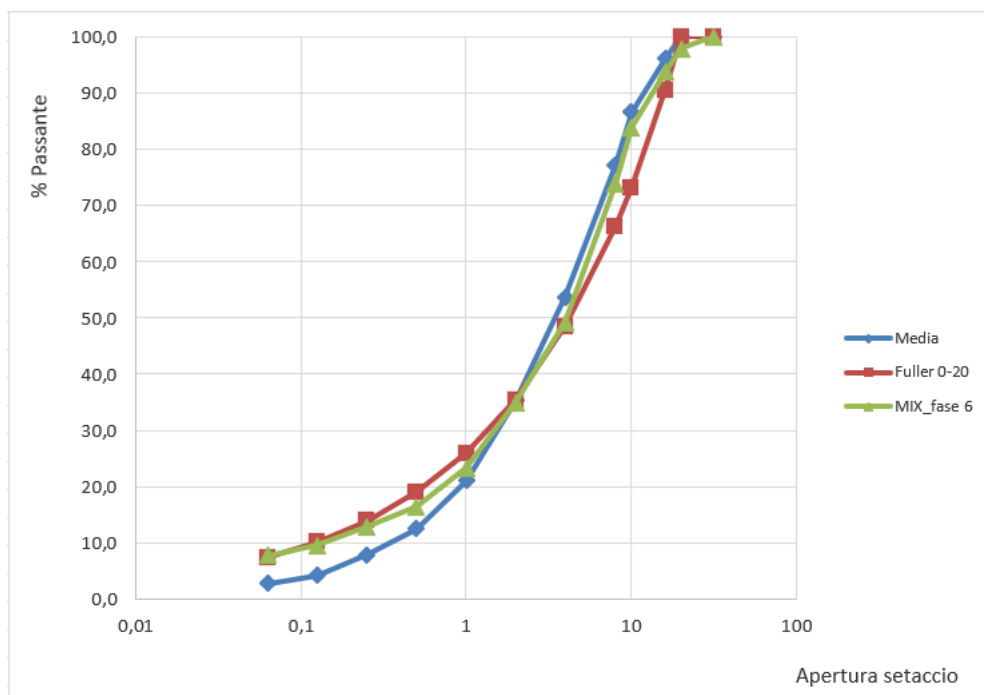


Figura 4.78 - Curve granulometriche MIX_fase 6

4.2.1.4 Confronto varie miscele fase preliminare

Le 6 miscele preliminari sono state realizzate facendo variare solamente il dosaggio degli aggregati, come precedentemente descritto e mantenendo fissi i dosaggi di acqua, ovvero il 5%, e dell'emulsione bituminosa, ovvero il 4%, che si traduce in un dosaggio del solo bitume pari al 2,4%.

Di seguito viene riportato il confronto granulometrico tra le varie miscele:

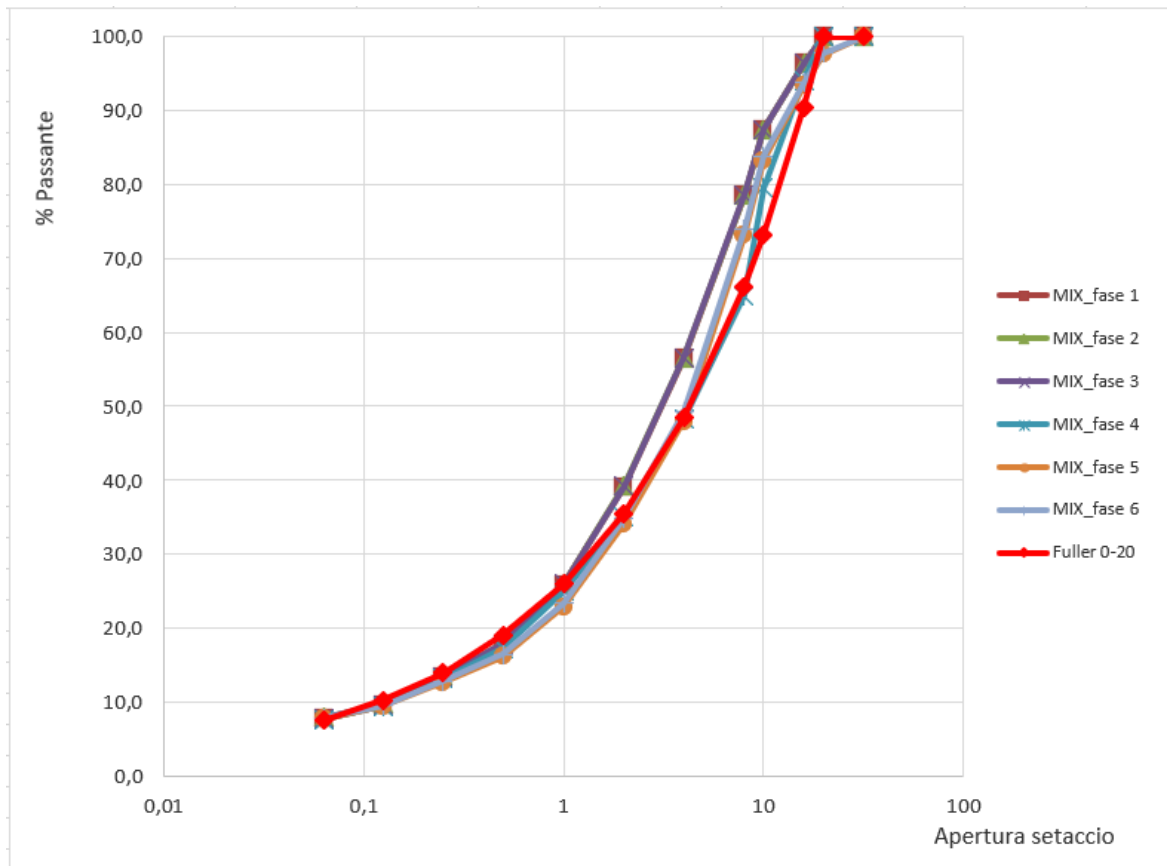


Figura 4.79 - Confronto granulometrico tra le varie miscele della fase preliminare

4.2.2 Scelta della miscela definitiva

Andando quindi a valutare l'errore percentuale tra la curva di Fuller 0-20 mm e quelle dei vari mix_fase si può andare a identificare quella più aderente alla curva di Fuller. Alla luce dei risultati ottenuti si è andati a definire la miscela definitiva con cui procedere alla sperimentazione, ovvero sfruttando il mix_fase 4. La miscela definitiva è quindi composta come segue:

- RAP in frazione fina 0 - 1 mm in quantità pari al 19% in peso della miscela
- RAP in frazione media 1 - 8 mm in quantità pari al 40% in peso della miscela
- RAP in frazione grossa 8-20 mm in quantità pari al 35% in peso della miscela
- Filler calcareo in quantità pari al 4% in peso della miscela
- Cemento Portland in quantità pari al 2% in peso della miscela
- Emulsione bituminosa 60% bitume pari al 4% in peso rispetto alla massa degli aggregati
- Contenuto complessivo di acqua nella miscela pari al 5% rispetto alla massa degli aggregati

4.2.3 Seconda fase

L'obiettivo di questa seconda fase è stato quello di caratterizzare e confrontare a livello prestazionale due famiglie di miscele di conglomerati riciclati a freddo in cui è stata fatta variare esclusivamente la presenza di fibre, il cui dosaggio è stato dello 0,2% in peso della massa di aggregati.

Avremo quindi una famiglia di miscele senza fibre e una famiglia di miscele con lo 0,2% di fibre.

4.2.3.1 Codifica provini

Per ogni famiglia sono stati realizzati più impasti, identificati, in ordine di confezionamento, con lettere dell'alfabeto in ordine crescente dalla lettera A.

Per ogni famiglia sono stati realizzati provini mantenendo un diametro costante di 150 mm:

- N. 53 provini costipati con pressa giratoria imponendo un numero fisso di giri pari a 100 e caratterizzati da un'altezza post compattazione circa pari a 70 mm;

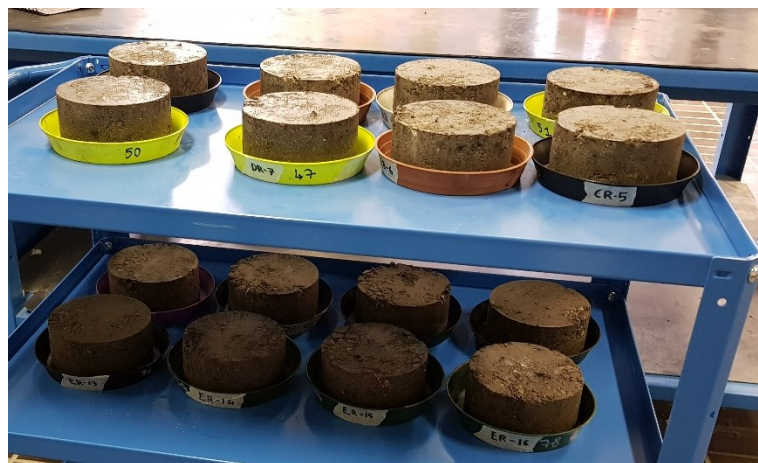


Figura 4.80 - Provini

I singoli provini, quindi, sono stati identificati secondo il seguente criterio:

- Lettera da A a Z per indicare cronologicamente l'impasto;
- Lettera R o F per indicare la famiglia, quindi se senza o con fibre;
- Simbolo _ ;
- Numero:
 - Nel caso di provini piccoli il numero è arabo crescente da 1 a 100 in ordine di realizzazione del singolo provino.

Quindi ad esempio il nome BF_9 indica un provino realizzato durante il secondo impasto (lettera B) della miscela con fibre (lettera F) ed è il nono (9) provino piccolo (numero arabo) realizzato per la famiglia F.

Sui provini sono state realizzate prove di:

- Contenuto percentuale di vuoti dopo 30 giorni
- Calcolo dei parametri di lavorabilità
- Modulo di rigidezza a trazione indiretta ITSM dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS per valutazione della Sensibilità all'acqua dopo 14 giorni più altri 3 giorni di condizionamento in aria o acqua.

Capitolo 5 - Analisi dei risultati

In questo capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui provini delle due famiglie di conglomerato bituminoso riciclato a freddo studiate.

Come descritto nel capitolo 4, si è eseguito uno studio preliminare sul RAP prelevato in cantiere, andando a determinare la curva granulometrica e la massa volumica degli aggregati attraverso il picnometro [Paragrafo 4.1.2].

Si sono quindi ipotizzate 6 miscele ed è stata determinata la miscela definitiva [Paragrafo 4.2.2] e sono stati confezionati i provini per le due diverse famiglie; quella per il riferimento, quindi senza fibre, e quella con le fibre.

I provini sono stati compattati con la pressa a taglio giratoria e sono stati posizionati in camera climatica a 40°C, per velocizzare la maturazione, per trenta giorni.

Di seguito sono riportati i risultati di tutti i test eseguiti sui provini, suddivisi per le due famiglie presenti nella suddetta sperimentazione, secondo il seguente ordine:

- Studio delle curve di compattazione e dei parametri di lavorabilità
- Valutazione della perdita di acqua
- Prove di Modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM)
- Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)
- Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITSr

5.1 Riferimento

Di seguito vengono riportati i nomi dei provini, classificati in base alla prova a cui sono stati assegnati:

- Le curve di compattazione, la perdita di acqua e i parametri di lavorabilità sono stati ricavati per tutti i provini ad eccezione dei 6 realizzati per la prova di sensibilità all'acqua, quindi:

CR_1; CR_2; CR_3; CR_4; CR_5; CR_6; DR_7; DR_8; DR_9; DR_10; DR_11; ER_12;
ER_13; ER_14; ER_15; ER_16;

- Il modulo di rigidezza a trazione indiretta è stato ricavato sui seguenti provini:
CR_1; CR_3; CR_5; DR_7; DR_9; DR_11; ER_13; ER_15;
- Le prove di rottura a trazione indiretta sono state eseguite sui seguenti provini:
CR_2; CR_4; CR_6; DR_8; DR_10; ER_12; ER_14; ER_16;
- La Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS è stata eseguita sfruttando i seguenti provini:
GR_17; GR_18; GR_19; GR_20; GR_11; GR_22.

La codifica dei provini inizia con la lettera C perché gli impasti A e B, ovvero i primi 2 realizzati, sono stati impiegati per altre prove non riguardanti questa analisi sperimentale.

5.1.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità

Le curve di compattazione sono state ricavate dai dati ottenuti durante la compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria. Sono stati inoltre eseguiti i calcoli dei parametri di lavorabilità, precedentemente descritti al paragrafo 4.1.4.

Di seguito vengono riportate le curve dei vari provini e le tabelle riepilogative dei parametri di lavorabilità, raggruppate per impasto.

5.1.1.1 Impasto CR

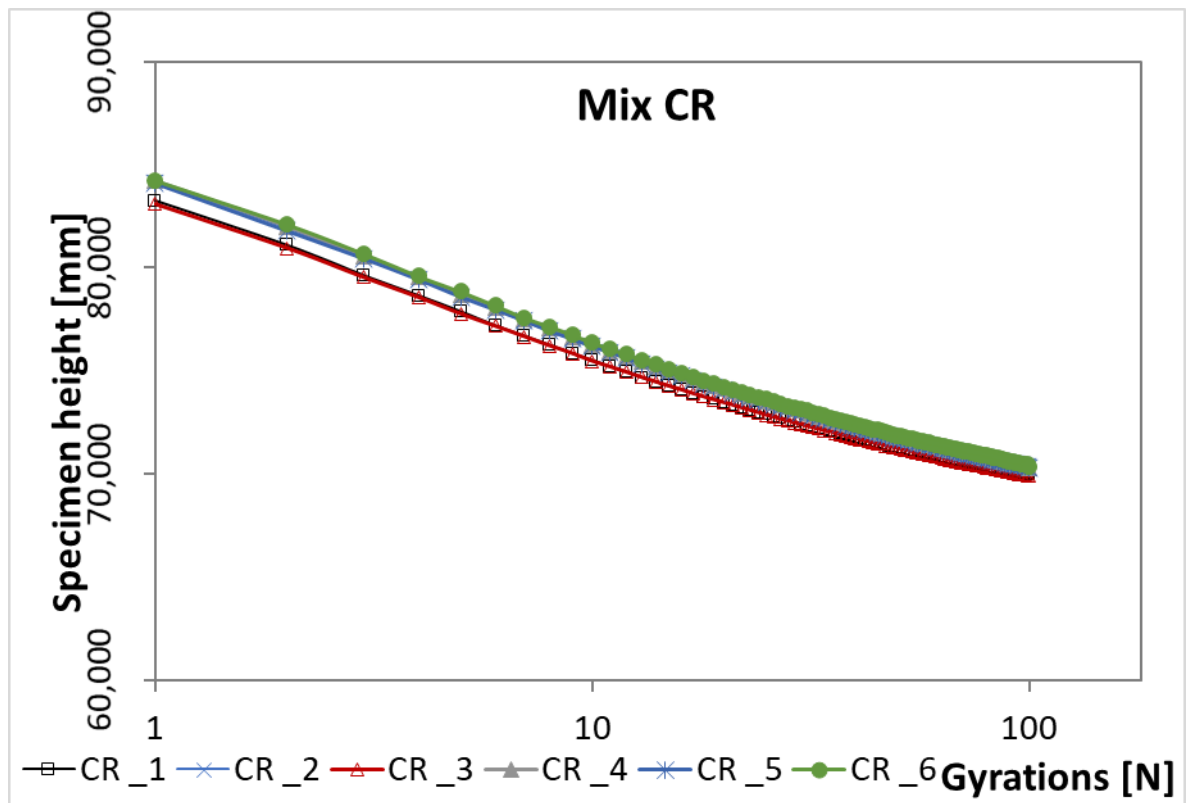


Figura 5.1 - Curve di compattazione provini dell'impasto CR

	C_1 [mm]	k [/]
1	50,641	2,0106
2	49,986	2,0763
3	50,64	2,0215
4	49,874	2,1043
5	49,983	2,09
6	49,813	2,1029
	50,156	2,068

Tabella 5.1 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto CR

5.1.1.2 Impasto DR

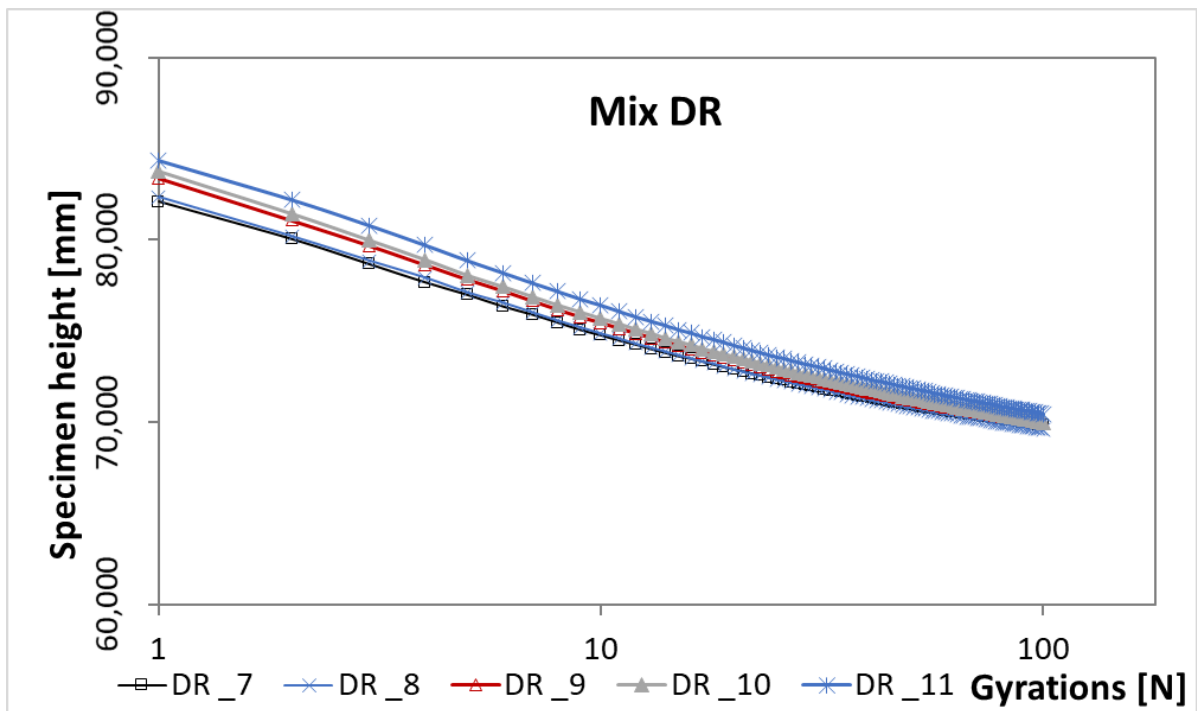


Figura 5.2 - Curve di compattazione provini dell'impasto DR

	C ₁ [mm]	k [/]
1	51,499	1,8573
2	51,213	1,9604
3	50,647	2,0190
4	50,36	2,0649
5	49,793	2,1064
	50,702	2,002

Tabella 5.1 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto DR

5.1.1.3 Impasto ER

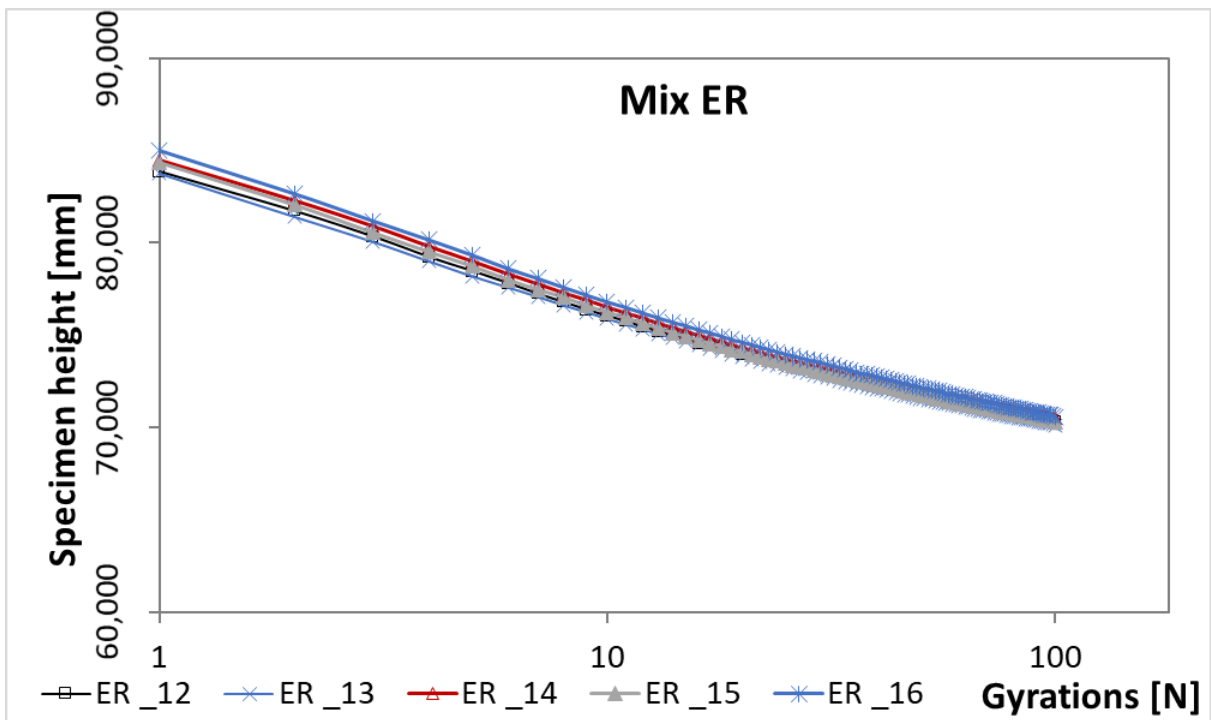


Figura 5.3 - Curve di compattazione provini dell'impasto ER

	C_1 [mm]	k [/]
1	50,168	2,0436
2	50,264	2,0512
3	49,704	2,1072
4	49,888	2,102
5	49,363	2,1584
	49,877	2,092

Tabella 5.2 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto ER

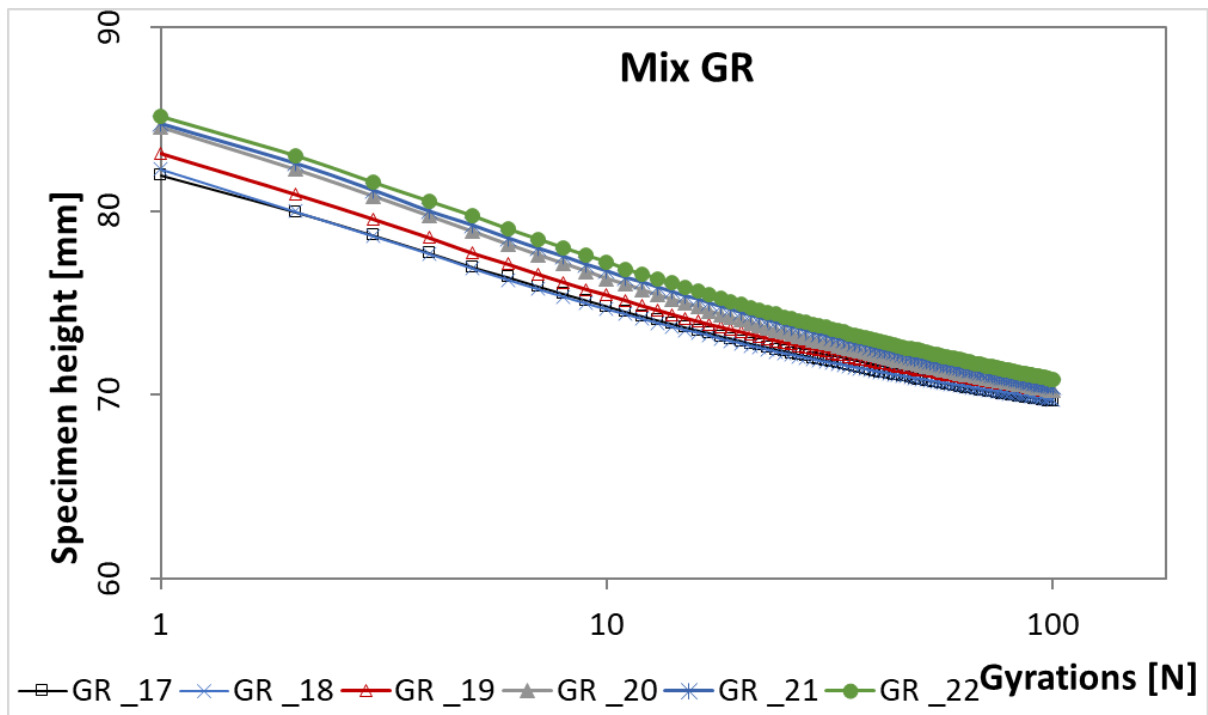
5.1.1.4 Impasto GR

Figura 5.4 - Curve di compattazione provini dell'impasto GR

	C_1 [mm]	k [/]
1	51,379	1,9095
2	51,546	1,8633
3	50,882	1,9244
4	49,727	2,1612
5	49,407	2,1816
6	49,114	2,172
	50,343	2,035

Tabella 5.3 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto GR

5.1.2 Perdita di acqua

5.1.2.1 Impasto CR



Figura 5.5 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto CR

5.1.2.2 Impasto DR

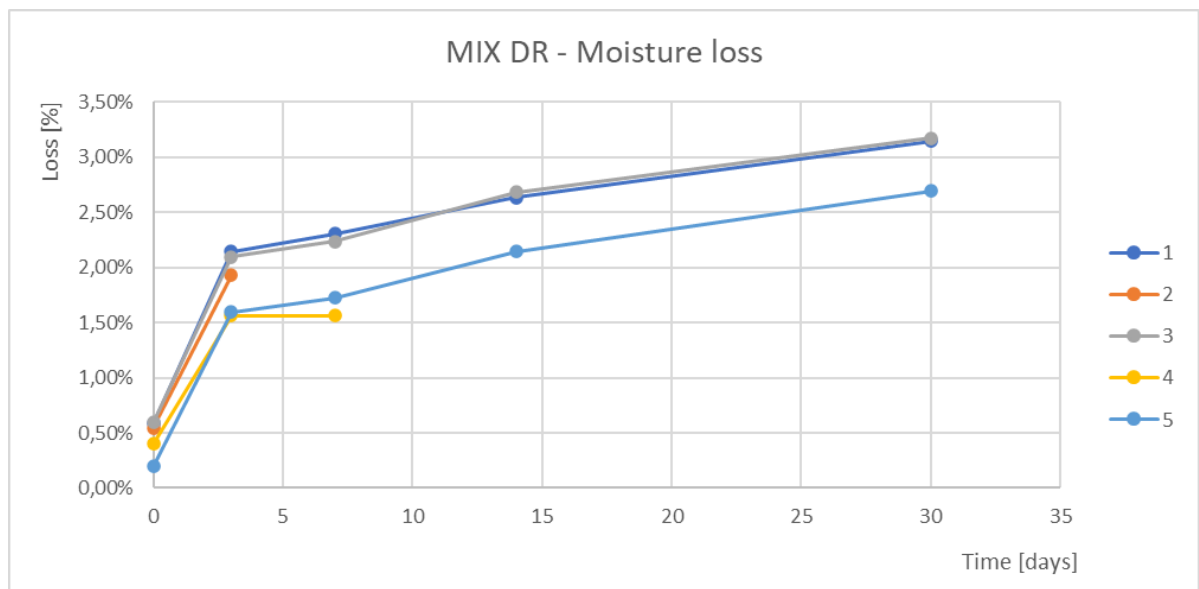


Figura 5.6 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto DR

5.1.2.3 Impasto ER

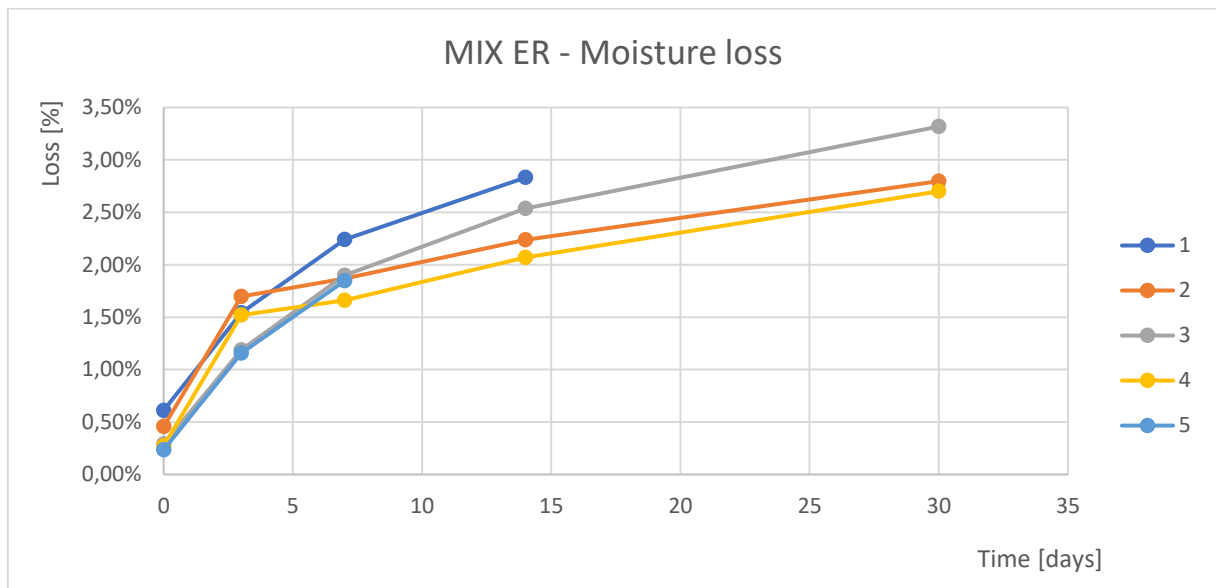


Figura 5.7 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto ER

5.1.3 Proprietà volumetriche dei provini

Vuoti	
$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
2,1780	12,0
2,1874	11,6
2,1878	11,6
2,1941	11,4
2,1711	12,3
2,1902	11,5
2,1797	11,9
2,1989	11,2
2,1697	12,3
2,1948	11,3
media	11,3

Tabella 5.5 – Riepilogo percentuale dei vuoti provini della famiglia Riferimento

5.1.4 Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)

La prova, come già descritto nel capitolo precedente, viene effettuata su due diagonali del provino ortogonali tra loro, calcolando la media si ottiene appunto il valore medio $ITSM_m$.

Codice	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
CR_1	4796	4451	4624	5331	5323	5327	5990	6014	6002	6642	6826	6734
CR_3	5097	4851	4974	5471	5722	5597	6557	6349	6453	7415	7053	7234
CR_5	4872	4570	4721	5546	5512	5529	6573	6134	6354	7367	6985	7176
DR_7	4683	4395	4539	5231	5268	5250	5957	5913	5935	6584	6624	6604
DR_9	4484	4310	4397	5065	5073	5069	5697	5546	5622	6699	6385	6542
DR_11	4974	4782	4878	5468	5357	5413	6285	6279	6282	7170	7276	7223
ER_13	5578	5456	5517	6393	6329	6361	7202	7018	7110	8178	8256	8217
ER_15	5189	5078	5134	5967	5860	5914	6672	6638	6655	7645	7587	7616
		media	4848		media	5557		media	6302		media	7168

Tabella 5.6 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia Riferimento

Si nota come il valore dei moduli cresca nel tempo: ciò dipende dall'aumento della rigidezza dovuta alla maturazione del cemento all'interno della miscela. Questo aumento dei valori dei moduli di rigidezza a trazione indiretta è ancor più apprezzabile nel seguente grafico:

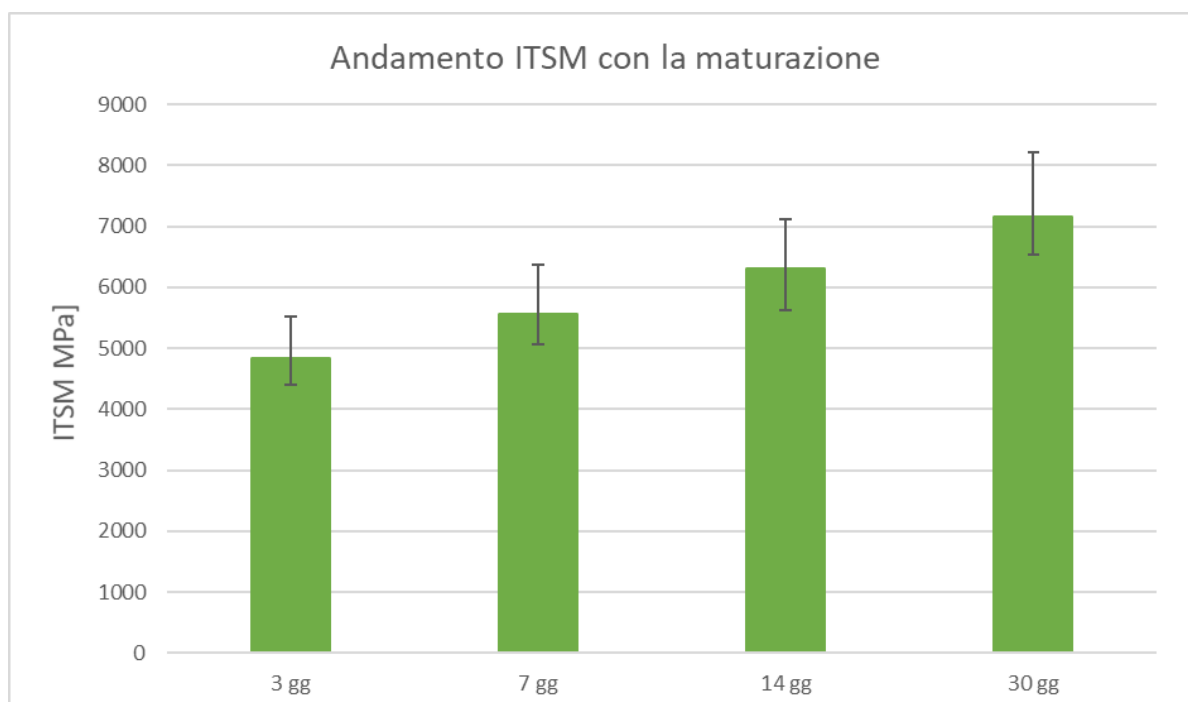


Figura 5.8 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia Riferimento

5.1.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

Codice	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
CR_2	0,03827	5,83587	0,348	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CR_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01844	9,7295	0,582
CR_6	-	-	-	-	-	-	0,0503	6,574468	0,393	-	-	-
DR_8	-	-	-	0,0168	5,7599	0,346	-	-	-	-	-	-
DR_10	0,04541	5,03647	0,301	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ER_12	-	-	-	-	-	-	0,052	7,762918	0,462	-	-	-
ER_14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0197	9,7143	0,575
ER_16	-	-	-	0,0483	5,9787	0,356	-	-	-	-	-	-
			0,325			0,351			0,428			0,579

Tabella 5.7 - Valori ITS nel tempo per la famiglia Riferimento

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

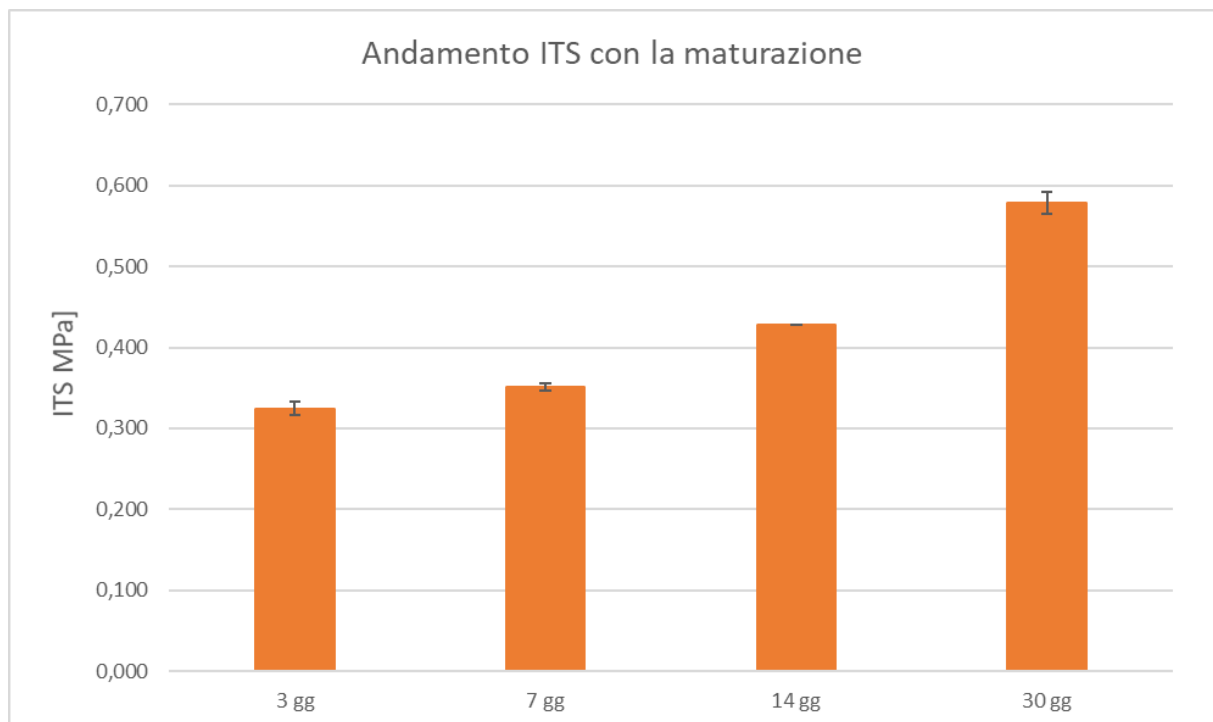


Figura 5.9 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia Riferimento

5.1.5.1 Calcolo CTI ed Energie

La prova a rottura ci restituisce una curva su un grafico forza-spostamento, da cui possiamo calcolarci l'indice CTI, che è un indice in funzione della pendenza della retta passante per l'origine ed il valore massimo della curva. Inoltre, si calcolano l'energia fino alla rottura (E_1), e

dopo la rottura (E_2). Tutte queste energie sono calcolate, discretizzando per parti l'area in trapezi.

Di seguito vengono riportati i risultati degli otto provini rotti a 3, 7, 14, 30 giorni.

5.1.5.1.1 Provini a 3 gg

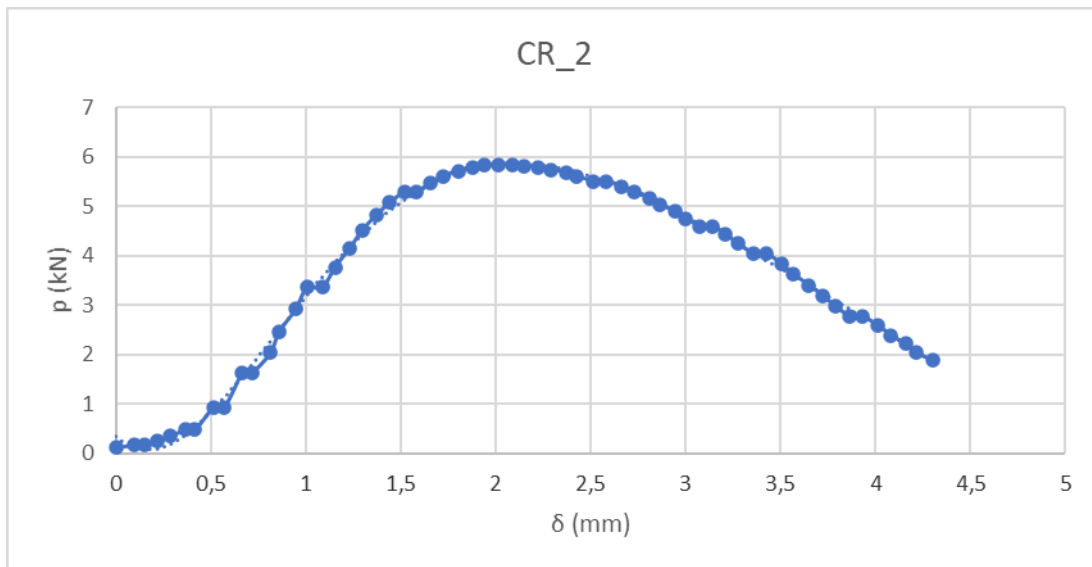


Figura 5.10 - Andamento ITSM, per il provino CR_2

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,38	15,92	6,57	9,35

Tabella 5.8 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino CR_2

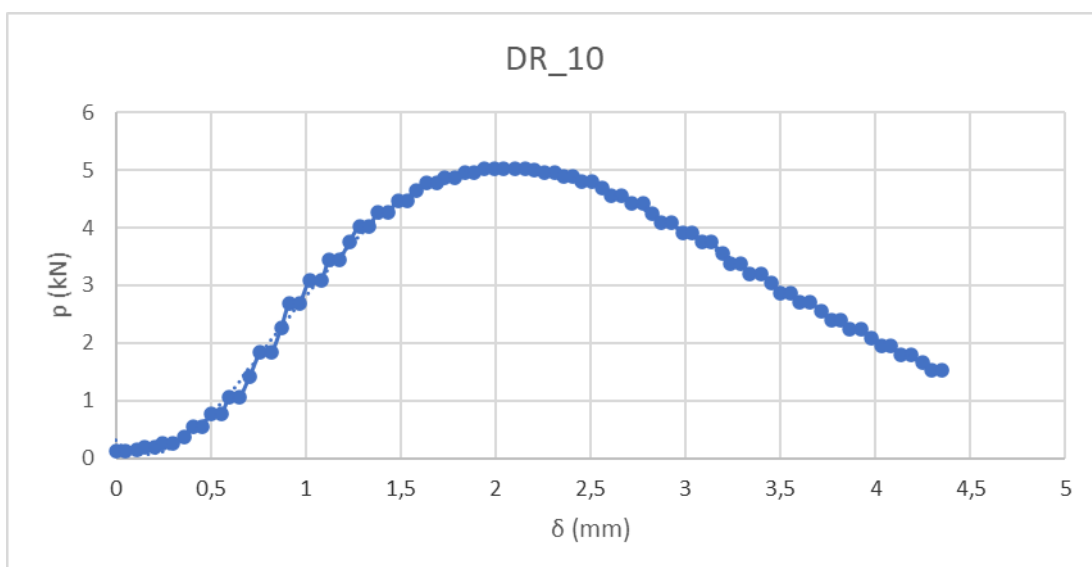


Figura 5.11 - Andamento ITSM, per il provino DR_10

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
3,97	13,54	5,27	8,27

Tabella 5.9 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino DR_10

5.1.5.1.2 Provini a 7 gg

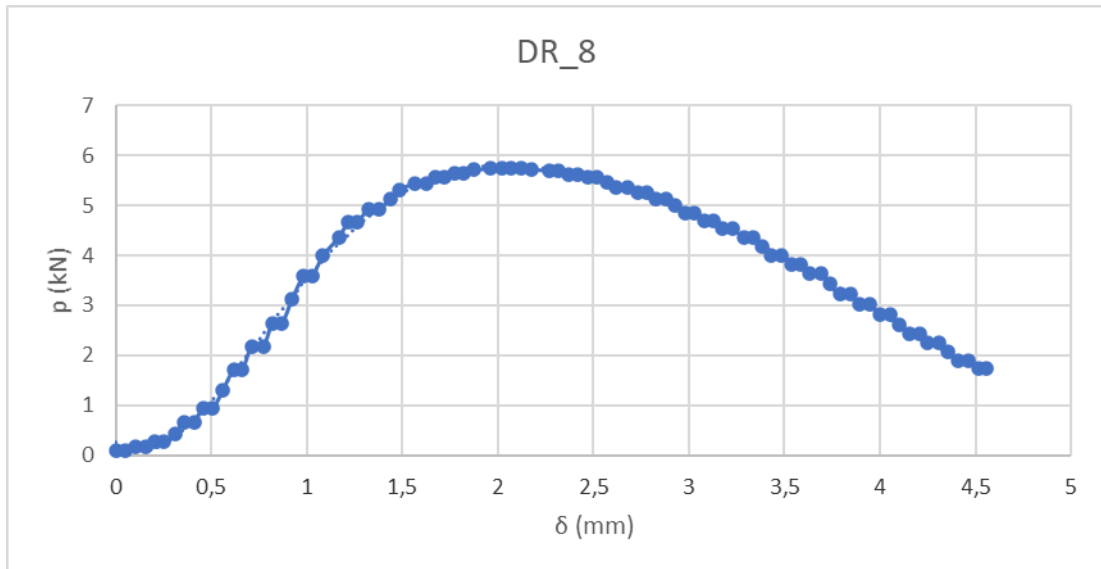


Figura 5.12 - Andamento ITSM, per il provino DR_8

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,48	17,04	6,52	10,53

Tabella 5.10 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino DR_8

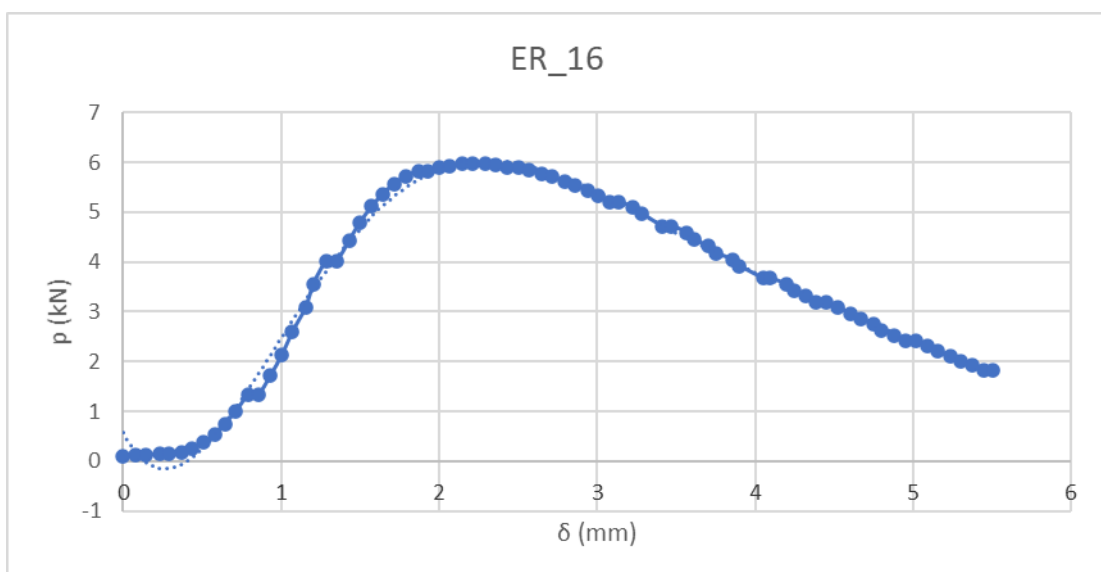


Figura 5.13 - Andamento ITSM, per il provino ER_16

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,25	19,77	6,46	13,31

Tabella 5.11 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino ER_16

5.1.5.1.3 Provini a 14 gg

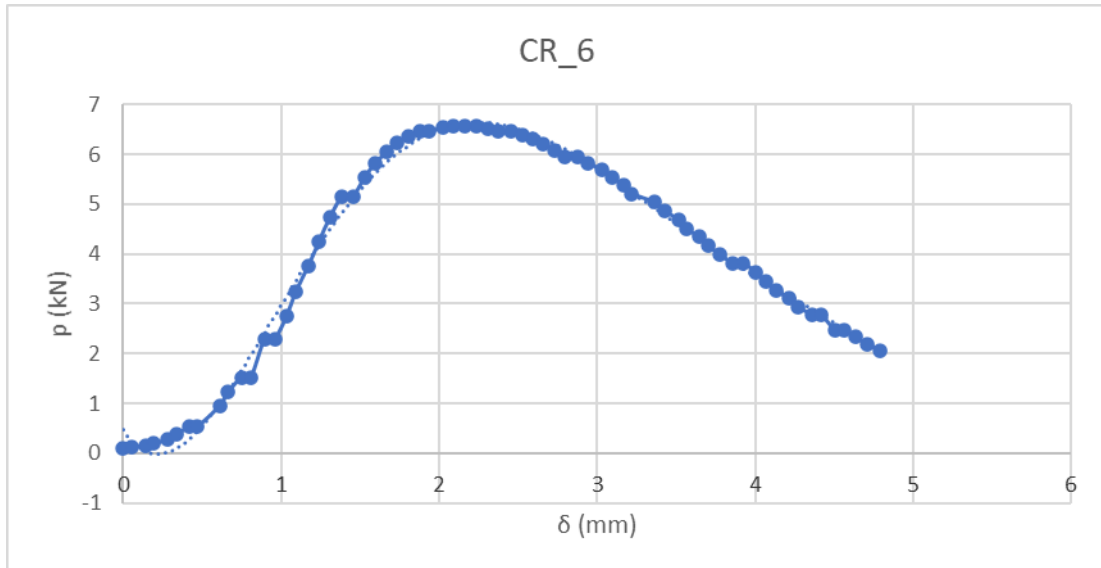


Figura 5.14 - Andamento ITSM, per il provino CR_6

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,77	19,25	7,19	12,06

Tabella 5.12 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino CR_6

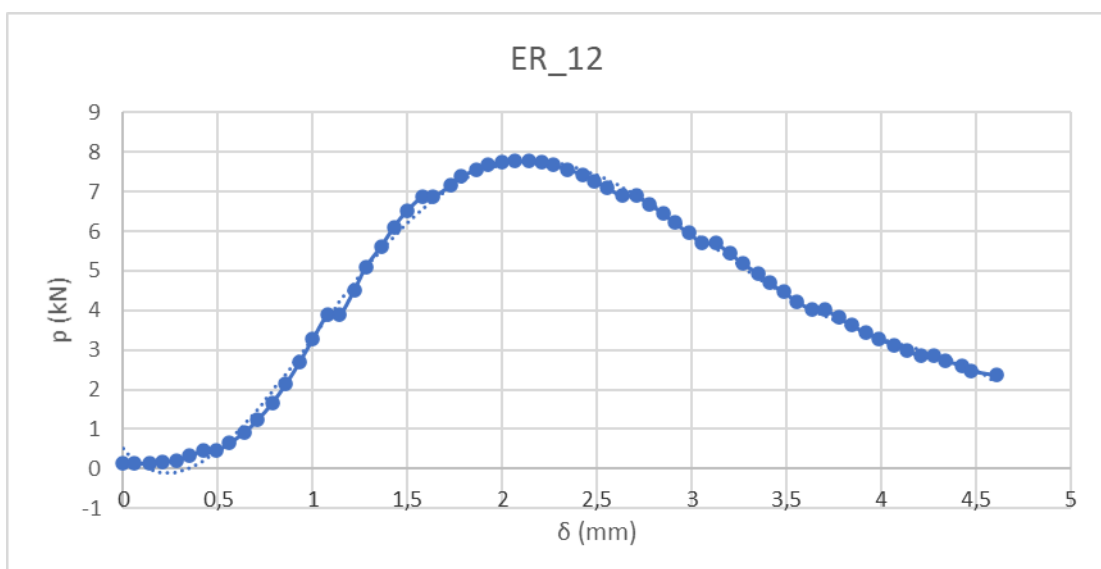


Figura 5.15 - Andamento ITSM, per il provino ER_12

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
5,91	20,31	7,46	12,86

Tabella 5.13 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino ER_12

5.1.5.1.4 Provini a 30 gg

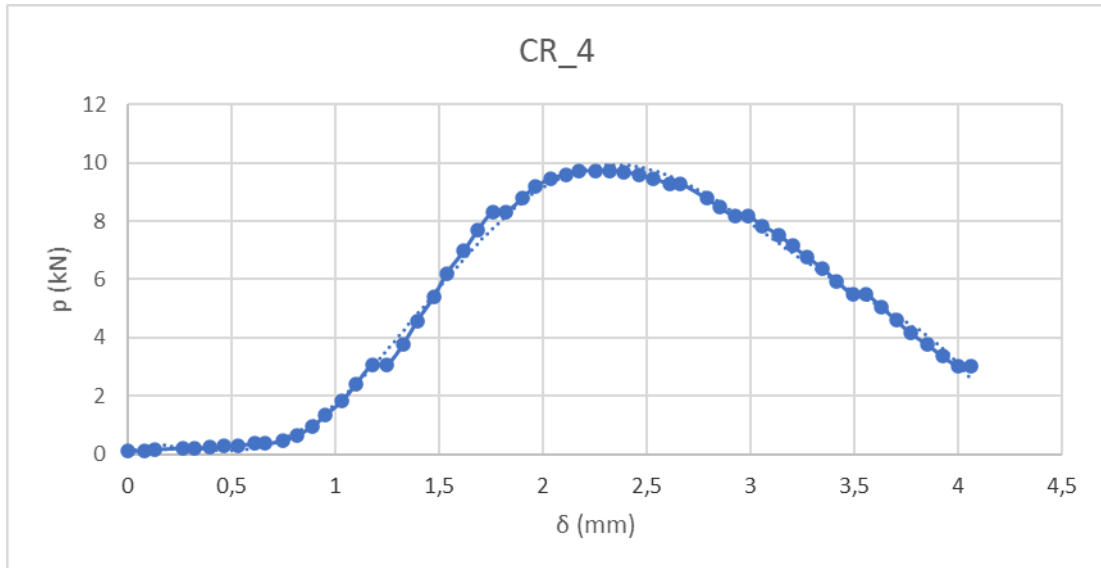


Figura 5.16 - Andamento ITSM, per il provino CR_4

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
6,79	21,14	8,53	12,62

Tabella 5.14 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino CR_4

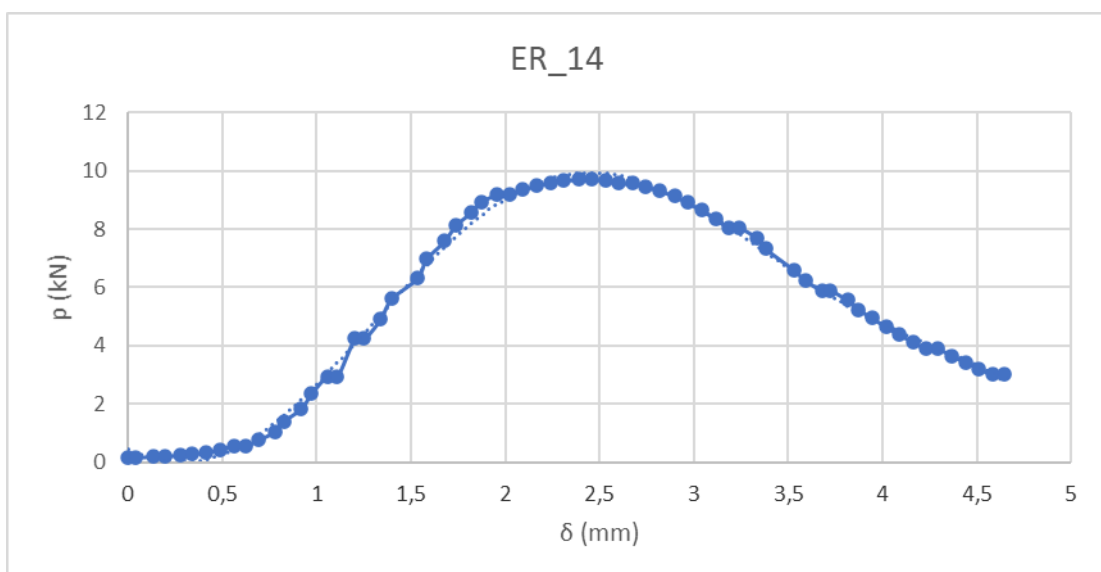


Figura 5.17 - Andamento ITSM, per il provino ER_14

CTI	E _{TOT}	E ₁	E ₂
6,38	25,58	10,60	14,98

Tabella 5.15 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino ER_14

5.1.6 Valutazione della Sensibilità all’Acqua attraverso la prova ITS

Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
GR_17	0,021554	8,088	0,486	-	-	-	0,89
GR_18	-	-	-	0,025486	7,289	0,438	
GR_19	0,021706	8,635	0,517	-	-	-	
GR_20	-	-	-	0,023652	7,380	0,440	
GR_21	0,02291	8,02736	0,481	-	-	-	
GR_22	-	-	-	0,023122	7,495	0,447	
			0,495			0,442	

Tabella 5.16 - Risultati rotture ITS per calcolo della Sensibilità all'Acqua, per la famiglia Riferimento

Come è riportato nella tabella precedente, è stato inoltre calcolato il valore ITS ratio [Paragrafo 4.1.7.1], calcolato come:

$$ITSr = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100$$

I risultati sono stati anche graficati:

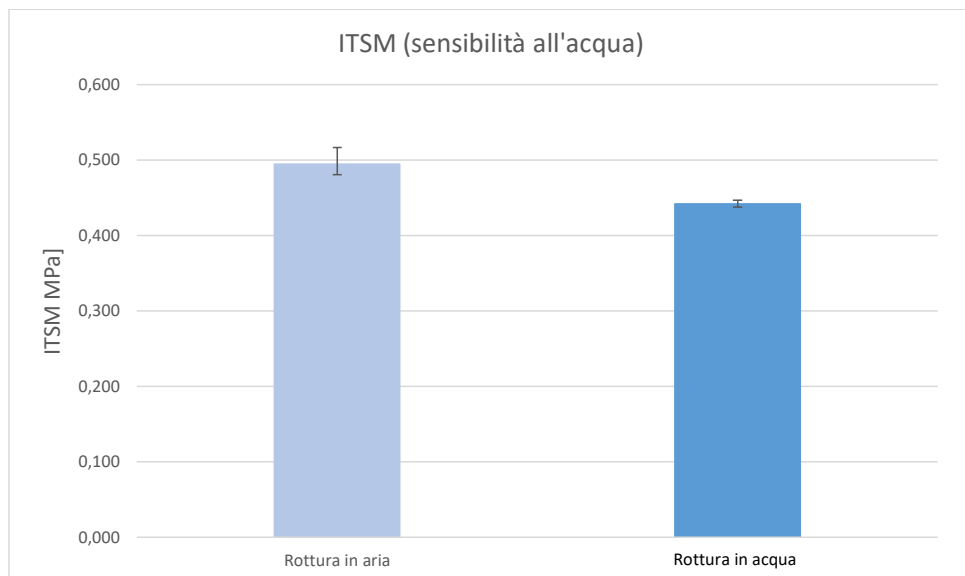


Figura 5.18 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia Riferimento

5.2 Fibre

Di seguito vengono riportati i nomi dei provini, classificati in base alla prova a cui sono stati assegnati:

- Le curve di compattazione, la perdita di acqua e i parametri di lavorabilità sono stati ricavati per tutti i provini ad eccezione dei 6 realizzati per la prova di sensibilità all'acqua, quindi:

AF0.2_1; AF0.2_2; AF0.2_3; AF0.2_4; AF0.2_5; AF0.2_6; BF0.2_7; BF0.2_8;
BF0.2_9; BF0.2_10; BF0.2_11; CF0.2_12; CF0.2_13; CF0.2_14; CF0.2_15;
CF0.2_16;

- Il modulo di rigidità a trazione indiretta è stato ricavato sui seguenti provini:
AF0.2_1; AF0.2_3; AF0.2_5; BF0.2_7; BF0.2_9; BF0.2_11; CF0.2_13; CF0.2_15;
- Le prove di rottura a trazione indiretta sono state eseguite sui seguenti provini:
AF0.2_2; AF0.2_4; AF0.2_6; BF0.2_8; BF0.2_10; CF0.2_12; CF0.2_14; CF0.2_16;
- La Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS è stata eseguita sfruttando i seguenti provini:
DF0.2_1; DF0.2_2; DF0.2_3; DF0.2_4; DF0.2_5; DF0.2_6.

5.2.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità

Le curve di compattazione sono state ricavate dai dati ottenuti durante la compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria. Sono stati inoltre eseguiti i calcoli dei parametri di lavorabilità, precedentemente descritti al paragrafo 4.1.4.

Di seguito vengono riportate le curve dei vari provini e le tabelle riepilogative dei parametri di lavorabilità, raggruppate per impasto.

5.2.1.1 Impasto AF0.2

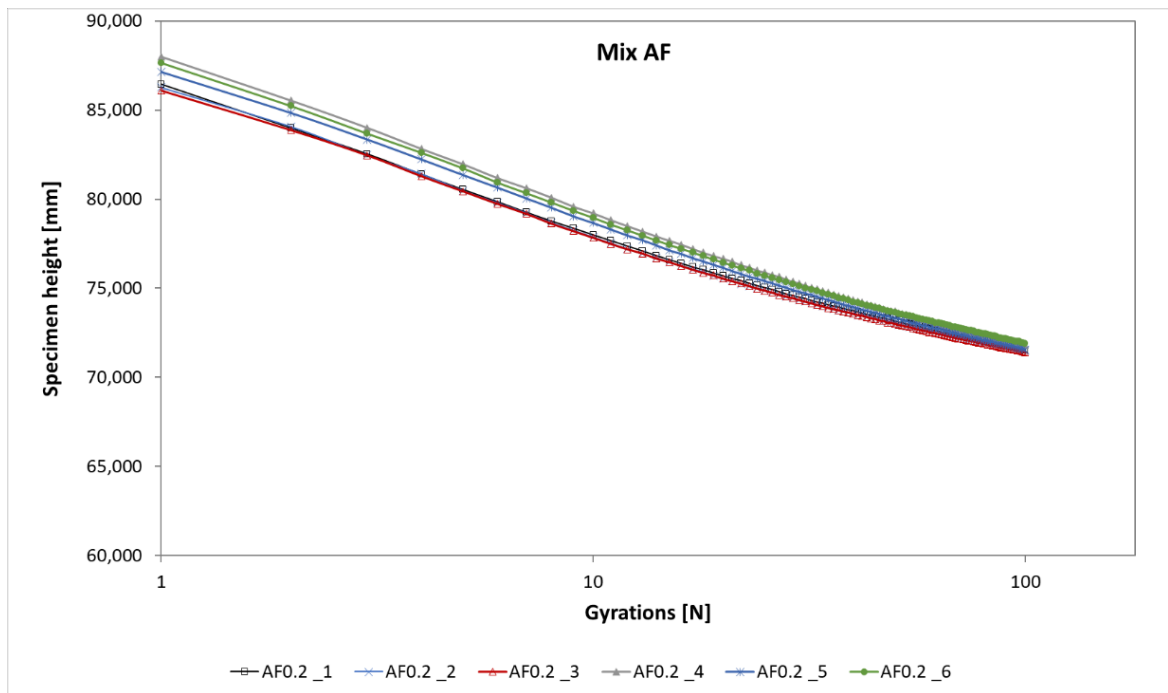


Figura 5.19 - Curve di compattazione provini dell'impasto AF0.2

	C_1 [mm]	k [\bar{V}]
1	48,52	2,18
2	48,63	2,16
3	48,63	2,18
4	47,31	2,38
5	47,81	2,32
6	47,63	2,3
	48,089	2,253

Tabella 5.17 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto AF0.2

5.2.1.2 Impasto BF0.2

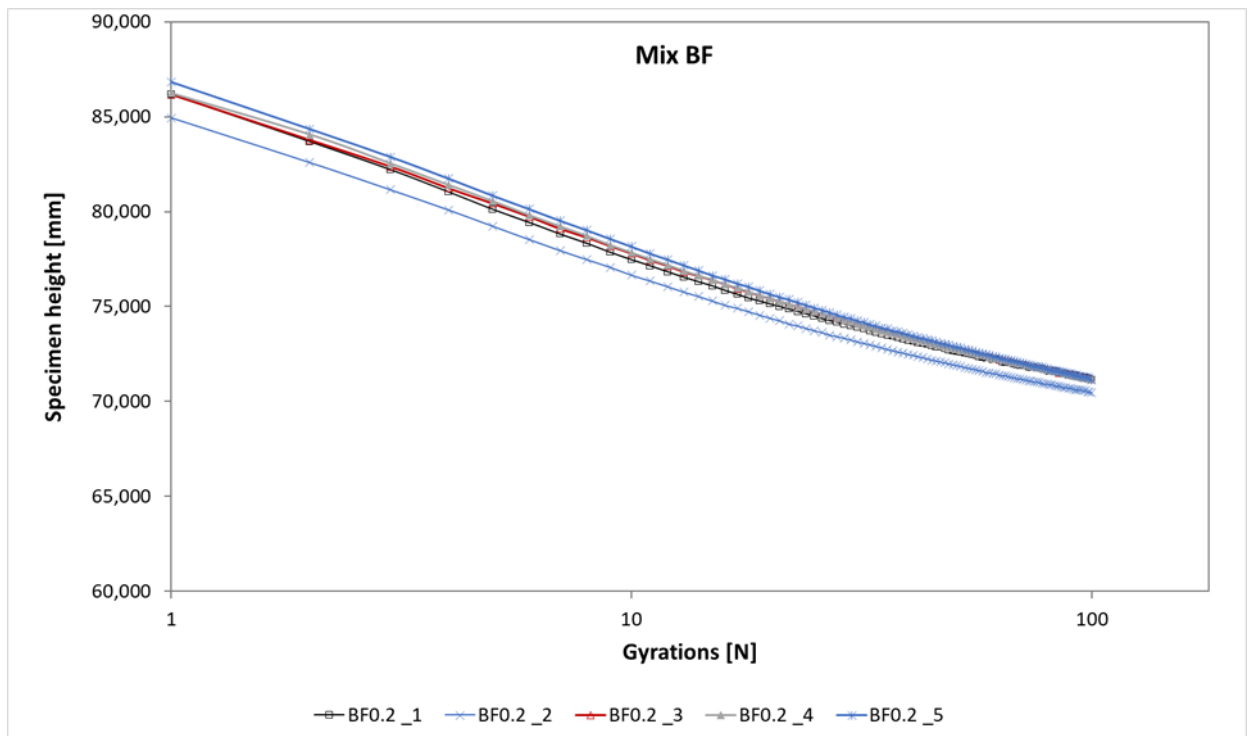


Figura 5.20 - Curve di compattazione provini dell'impasto BF0.2

	C_1 [mm]	k [\bar{J}]
1	48,83	2,19
2	49,45	2,18
3	48,59	2,23
4	48,48	2,29
5	48,12	2,32
	48,694	2,242

Tabella 5.18 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto BF0.2

5.2.1.3 Impasto CF0.2

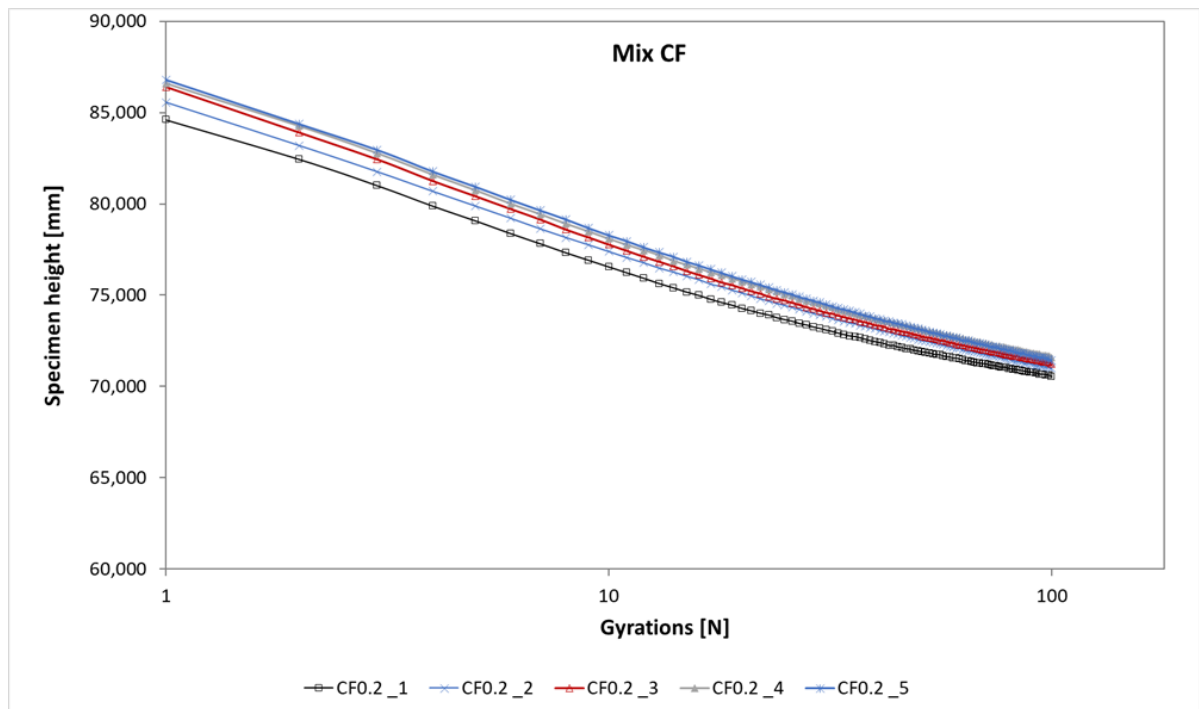


Figura 5.21 - Curve di compattazione provini dell'impasto CF0.2

	C_1 [mm]	k [l]
1	49,68	2,16
2	48,98	2,17
3	48,60	2,22
4	48,44	2,19
5	48,13	2,27
	48,766	2,202

Tabella 5.19 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto CF0.2

5.2.2 Perdita di acqua

5.2.2.1 Impasto AF0.2

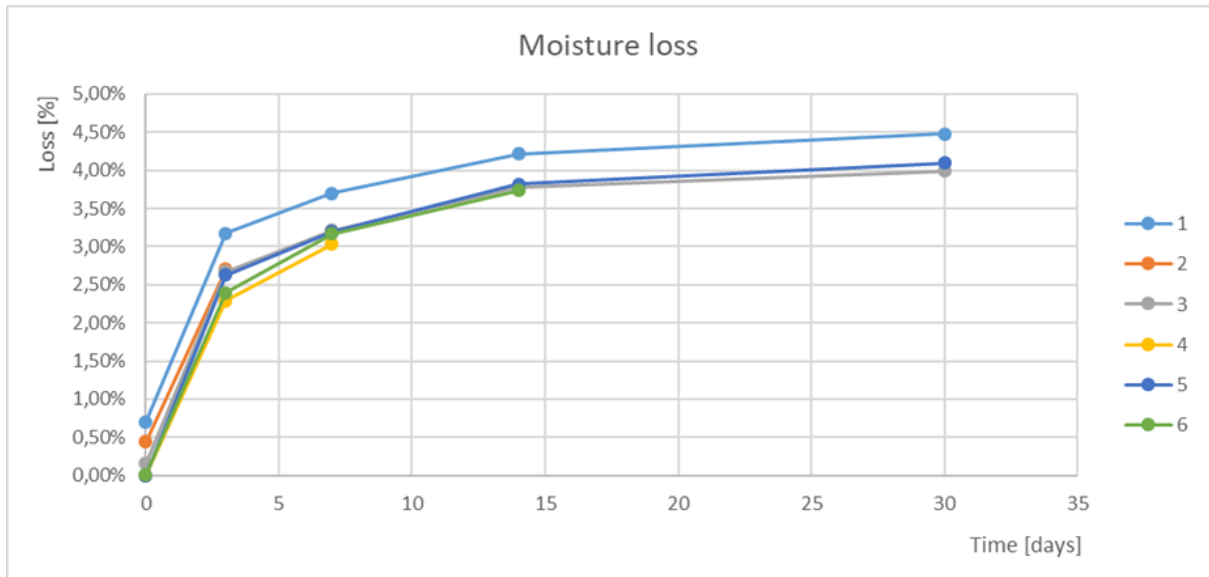


Figura 5.22 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto AF0.2

5.2.2.2 Impasto BF0.2



Figura 5.23 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto BF0.2

5.2.2.3 Impasto CF0.2



Figura 5.24 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto CF0.2

5.2.3 Proprietà volumetriche dei provini

Vuoti	
$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
2,1130	14,6
2,1398	13,5
2,1434	13,4
2,1535	13,0
2,1265	14,1
2,1403	13,5
2,1684	12,4
2,1472	13,3
2,1527	13,0
2,1570	12,9
media	12,9

Tabella 5.20 - Riepilogo percentuale dei vuoti provini della famiglia Fibre

5.2.4 Prove di Modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM)

La prova, come già descritto nel capitolo precedente, viene effettuata su due diagonali del provino ortogonali tra loro, calcolando la media si ottiene appunto il valore medio $ITSM_m$.

Codice	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF_1	3706	3832	3769	4744	4649	4697	5066	4831	4949	5929	5832	5881
AF_3	4056	4031	4044	4938	4808	4873	5362	5312	5337	6151	6005	6078
AF_5	4534	4377	4456	5523	5563	5543	6133	6079	6106	6857	6557	6707
BF_7	3838	3725	3782	4739	4516	4628	5008	4909	4959	5553	5699	5626
BF_9	4071	4100	4086	4986	5021	5004	5282	5701	5492	6020	5938	5979
BF_11	4528	4388	4458	5654	5461	5558	6252	6054	6153	7254	6423	6839
CF_13	4155	4019	4087	5208	5014	5111	5358	5367	5363	6444	6116	6280
CF_15	3857	3823	3840	5182	4897	5040	5515	5337	5426	6372	6010	6191
	media		4065	media		5056	media		5473	media		6198

Tabella 5.21 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia Fibre

Si nota come il valore dei moduli cresce nel tempo: ciò dipende dall'aumento della rigidità dovuta alla maturazione del cemento all'interno della miscela. Questo aumento dei valori dei moduli di rigidità a trazione indiretta è ancor più apprezzabile nel seguente grafico:

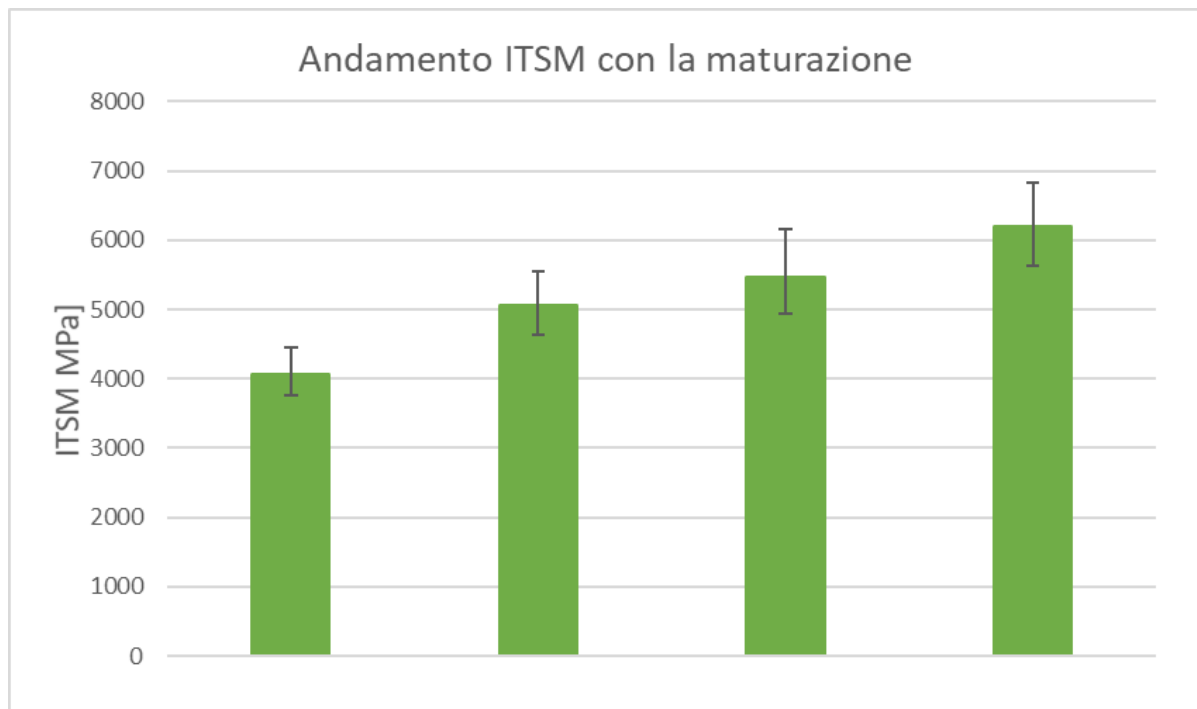


Figura 5.25 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia Fibre

5.2.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

Codice	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
AF_2	0,03835	6,08815	0,352	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AF_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02602	8,82371	0,513
AF_6	-	-	-	-	-	-	0,02977	9,060791	0,527	-	-	-
BF_8	-	-	-	0,025629	7,039514	0,417	-	-	-	-	-	-
BF_10	0,03968	5,86322	0,343	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF_12	-	-	-	-	-	-	0,035419	8,729484	0,511	-	-	-
CF_14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04235	9,58663	0,561
CF_16	-	-	-	0,054765	7,112462	0,418	-	-	-	-	-	-
			0,348			0,418			0,519			0,537

Tabella 5.22 - Valori ITS nel tempo per la famiglia Fibre

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

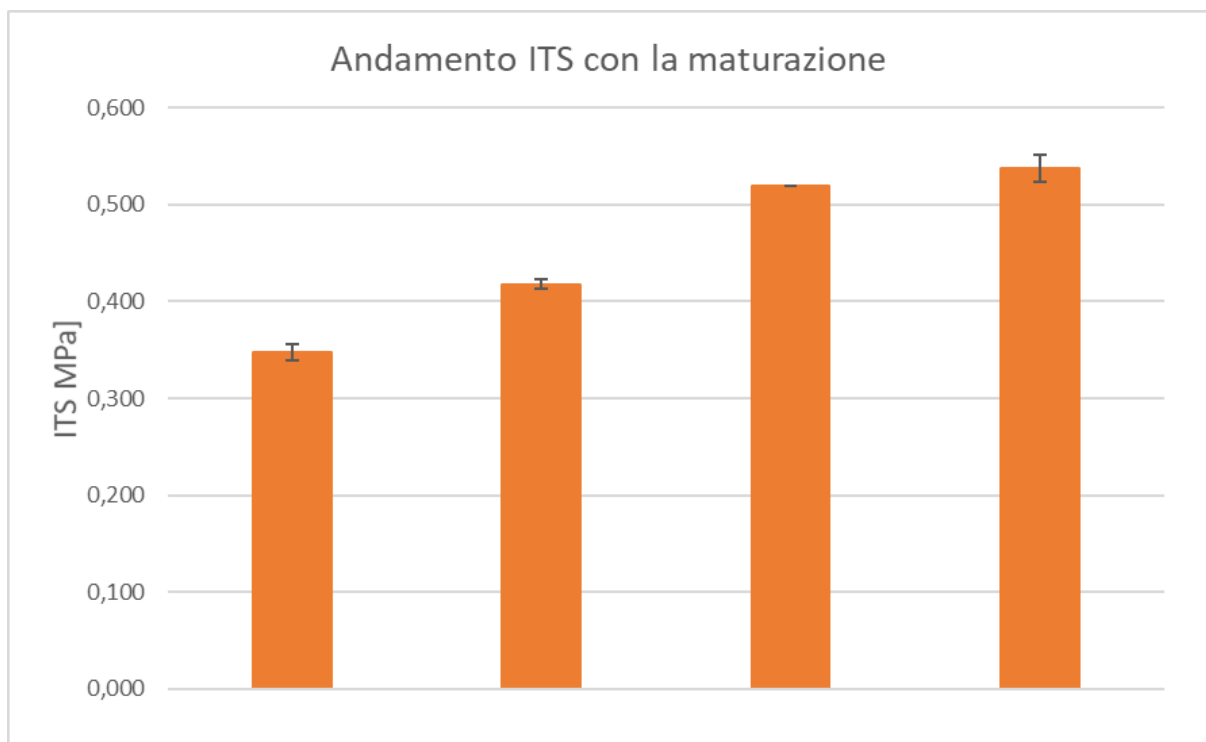


Figura 5.26 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia Fibre

5.2.5.1 Calcolo CTI ed Energie

La prova a rottura ci restituisce una curva su un grafico forza-spostamento, da cui possiamo calcolarci l'indice CTI, che è un indice in funzione della pendenza della retta passante per l'origine ed il valore massimo della curva. Inoltre, si calcolano l'energia fino alla rottura (E_1), e

dopo la rottura (E_2). Tutte queste energie sono calcolate, discretizzando per parti l'area in trapezi.

Di seguito vengono riportati i risultati degli otto provini rotti a 3, 7, 14, 30 giorni.

5.2.5.1.1 Provini a 3 gg

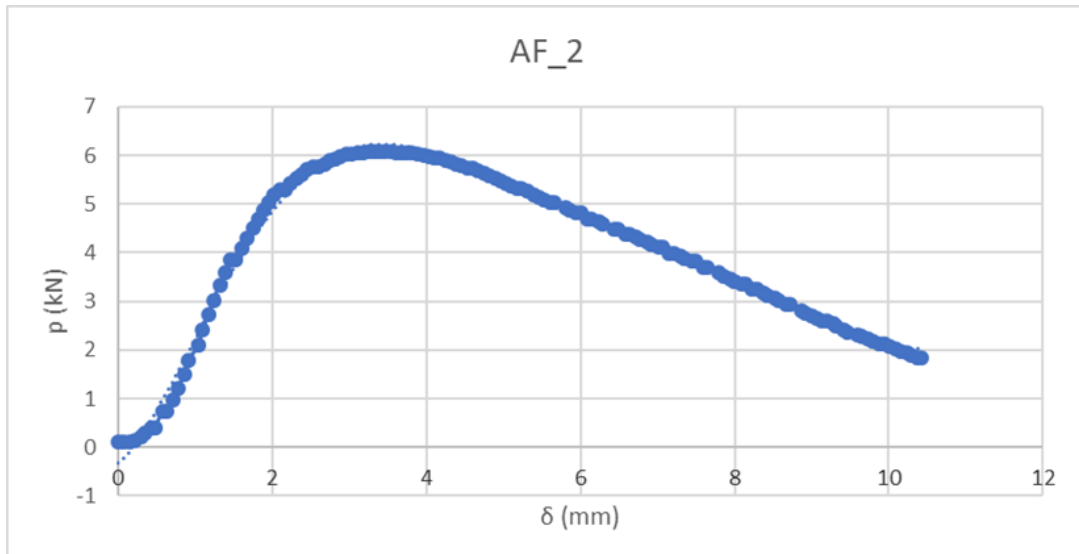


Figura 5.27 - Andamento ITSM, per il provino AF_2

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
3,96	41,56	12,47	29,09

Tabella 5.23 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino AF_2

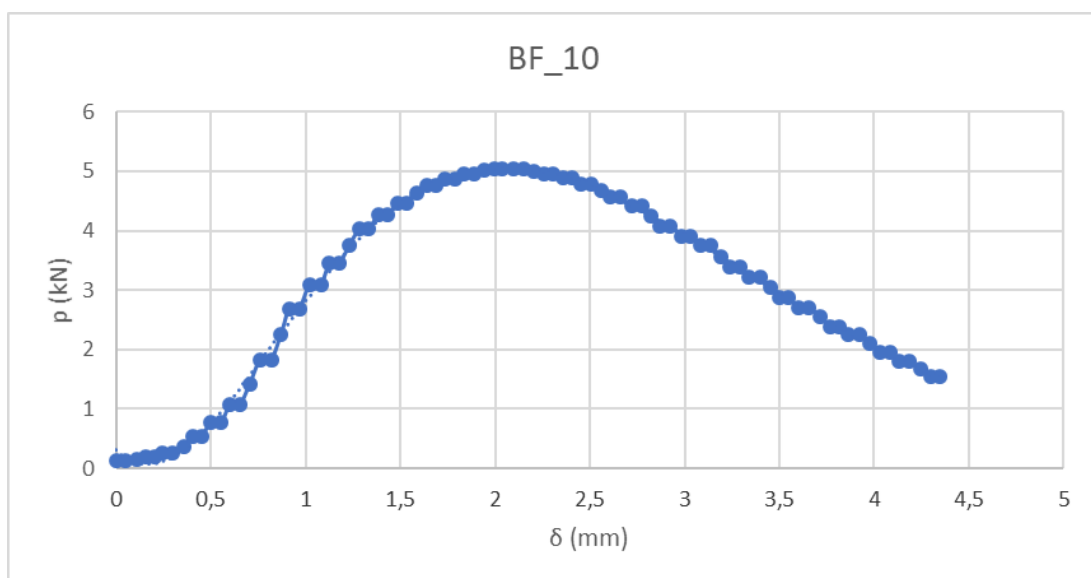


Figura 5.28 - Andamento ITSM, per il provino BF_10

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
3,97	13,54	5,27	8,27

Tabella 5.24 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino BF_10

5.2.5.1.2 *Provini a 7 gg*

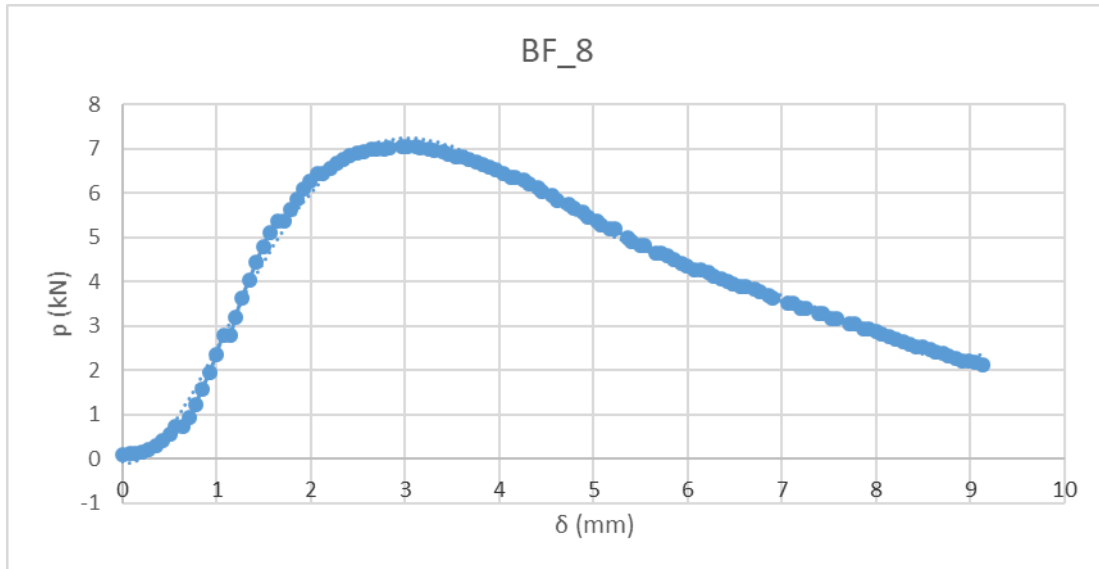


Figura 5.29 - Andamento ITSM, per il provino BF_8

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
3,55	39,73	12,89	26,84

Tabella 5.25 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino BF_8

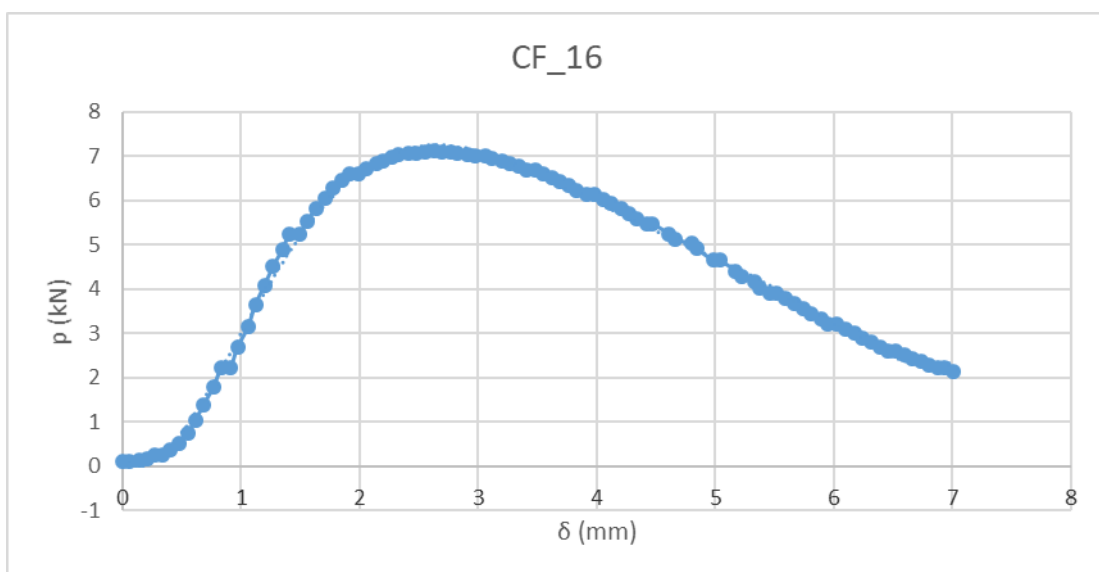


Figura 5.30 - Andamento ITSM, per il provino CF_16

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
3,60	31,72	10,52	21,20

Tabella 5.26 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino CF_16

5.2.5.1.3 Provini a 14 gg

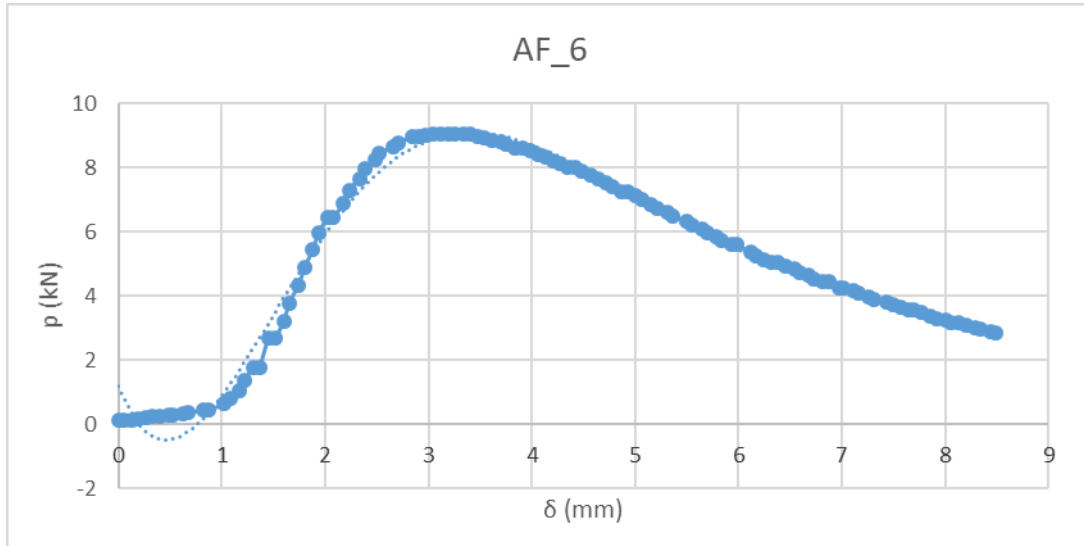


Figura 5.31 - Andamento ITSM, per il provino AF_6

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,46	44,38	13,07	31,31

Tabella 5.27 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino AF_6

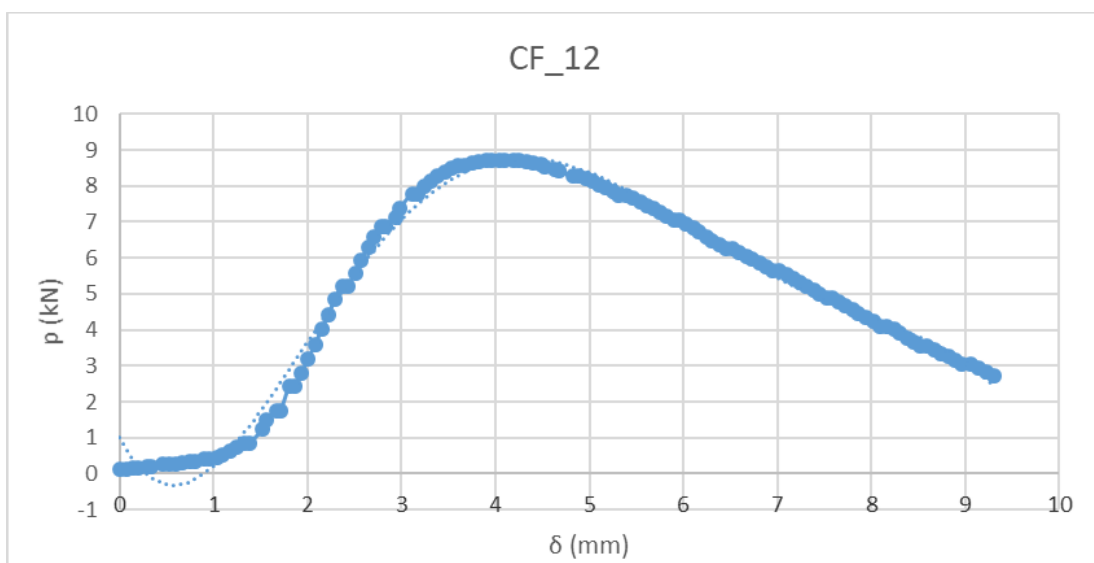


Figura 5.32 - Andamento ITSM, per il provino CF_12

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
3,39	47,36	15,93	31,43

Tabella 5.28 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino CF_12

5.2.5.1.4 Provini a 30 gg

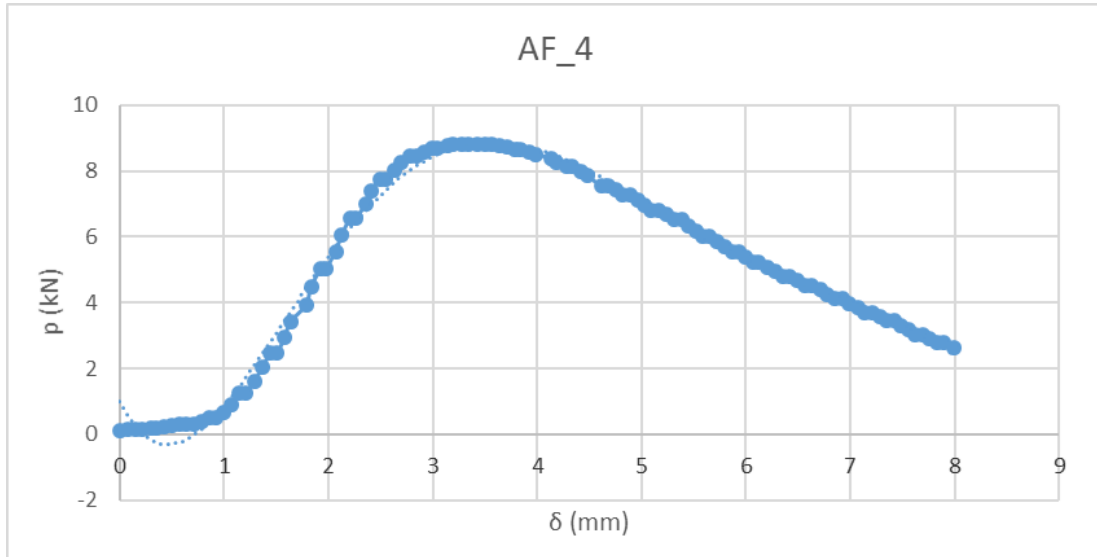


Figura 5.33 - Andamento ITSM, per il provino AF_4

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,22	41,10	12,93	28,18

Tabella 5.29 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino AF_4

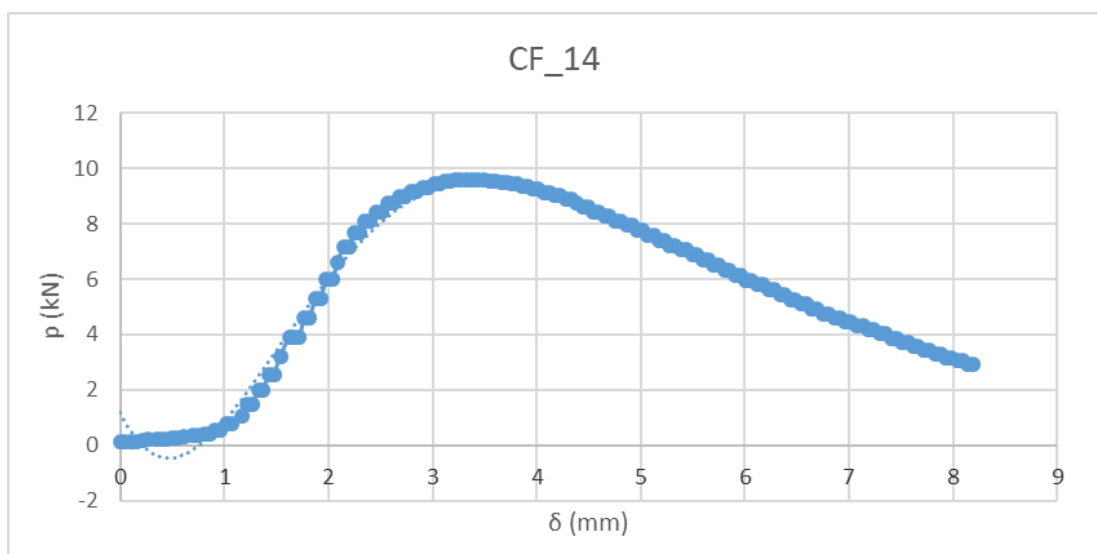


Figura 5.34 - Andamento ITSM, per il provino CF_14

CTI	E _{TOT}	E ₁	E ₂
4,53	46,01	14,61	31,40

Tabella 5.30 – Valori CTI ed Energia nel tempo per il provino CF_14

5.2.6 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS

Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
DF0,2%_1	0,038	7,325	0,428	-	-	-	0,852
DF0,2%_2	-	-	-	0,213	6,158	0,359	
DF0,2%_3	0,021	7,973	0,463	-	-	-	
DF0,2%_4	-	-	-	0,021	6,122	0,354	
DF0,2%_5	0,048	6,416	0,374	-	-	-	
DF0,2%_6	-	-	-	0,033	6,264	0,365	
		media	0,422		media	0,359	

Tabella 5.31 - Risultati rotture ITS per calcolo della Sensibilità all'Acqua, per la famiglia Fibre

Come è riportato nella tabella precedente, è stato inoltre calcolato il valore ITS ratio [Paragrafo 4.1.7.1], calcolato come:

$$ITSr = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100$$

I risultati sono stati anche graficati:

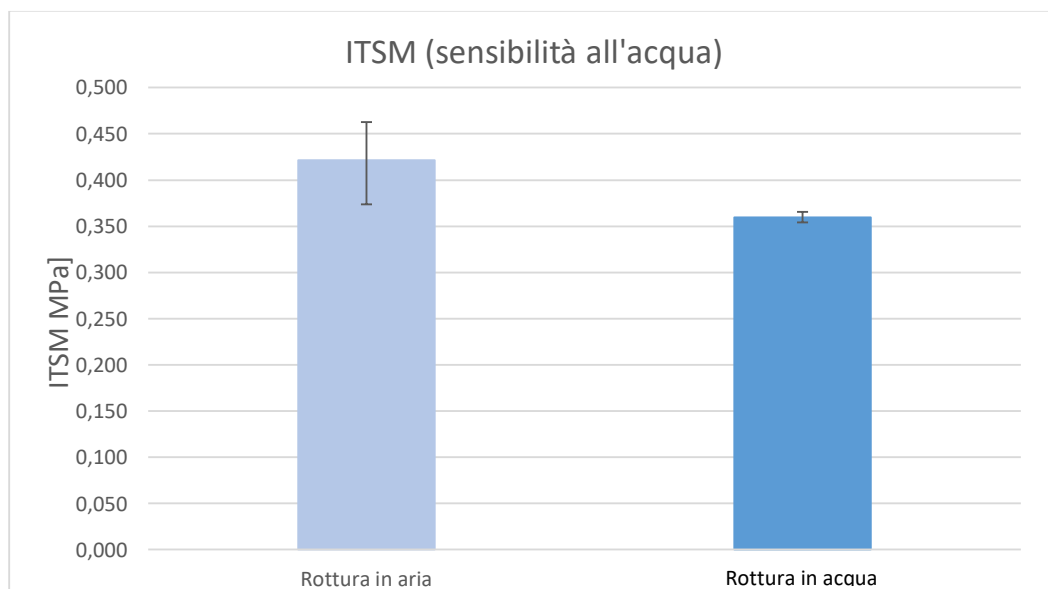


Figura 5.35 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia Fibre

5.3 Confronto tra le famiglie

5.3.1 Parametri di lavorabilità

Di seguito vengono riportate le tabelle riassuntive dei parametri C_1 e k raggruppati per famiglia di impasti.

Riferimento	C_1 [%]	k [/]
media	50,27	2,05

Tabella 5.32 - Riepilogo parametri di lavorabilità Riferimento

Fibre	C_1 [%]	k [/]
media	36,39	2,23

Tabella 5.33 - Riepilogo parametri di lavorabilità Fibre

Dai risultati si nota come ci siano cambiamenti sostanziali in termini di lavorabilità tra gli impasti prodotti al variare della presenza o meno di fibre.

5.3.2 Percentuale dei vuoti

Riferimento	$V_{m,geom}$ [%]
media	11,3

Tabella 5.34 – Riepilogo percentuale dei vuoti Riferimento

Fibre	$V_{m,geom}$ [%]
media	12,9

Tabella 5.35 – Riepilogo percentuale dei vuoti Fibre

Dai risultati si evidenzia come mediamente i provini confezionati con le fibre abbiano una presenza di vuoti maggiore del riferimento.

5.3.3 Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)

Il confronto viene rappresentato nel seguente grafico, in cui viene anche indicato il limite di normativa:

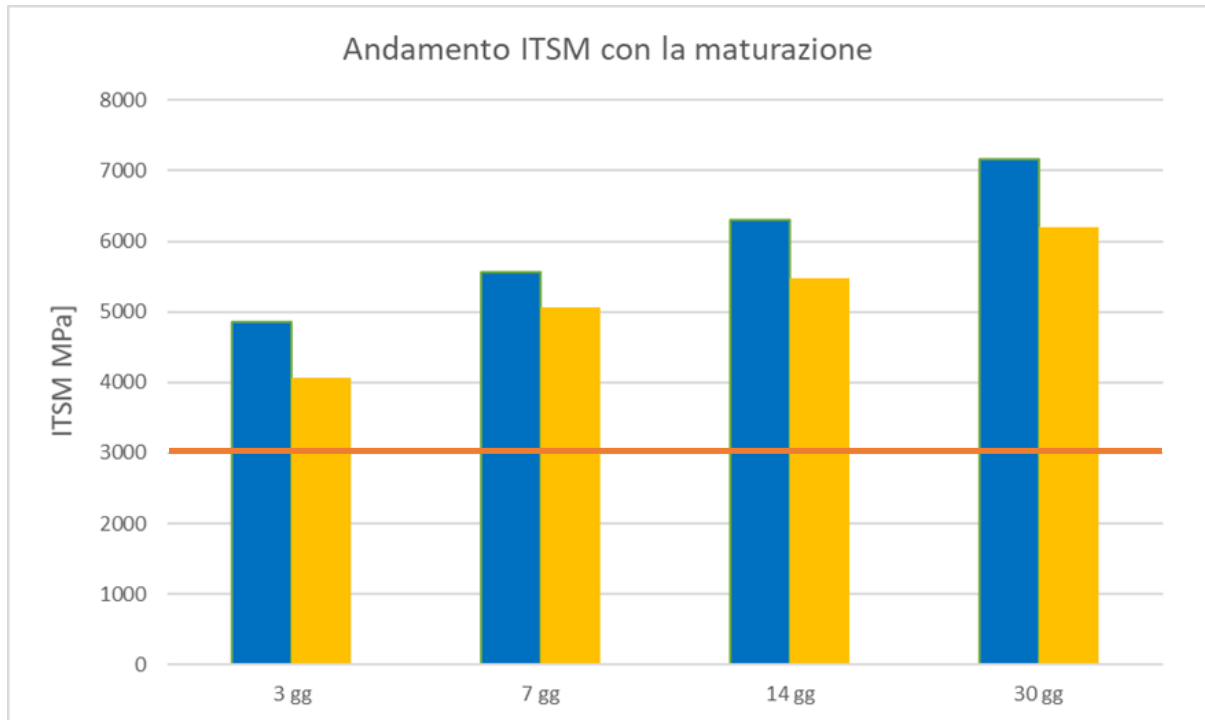


Figura 5.36 - Riepilogo e confronto valori ITSM

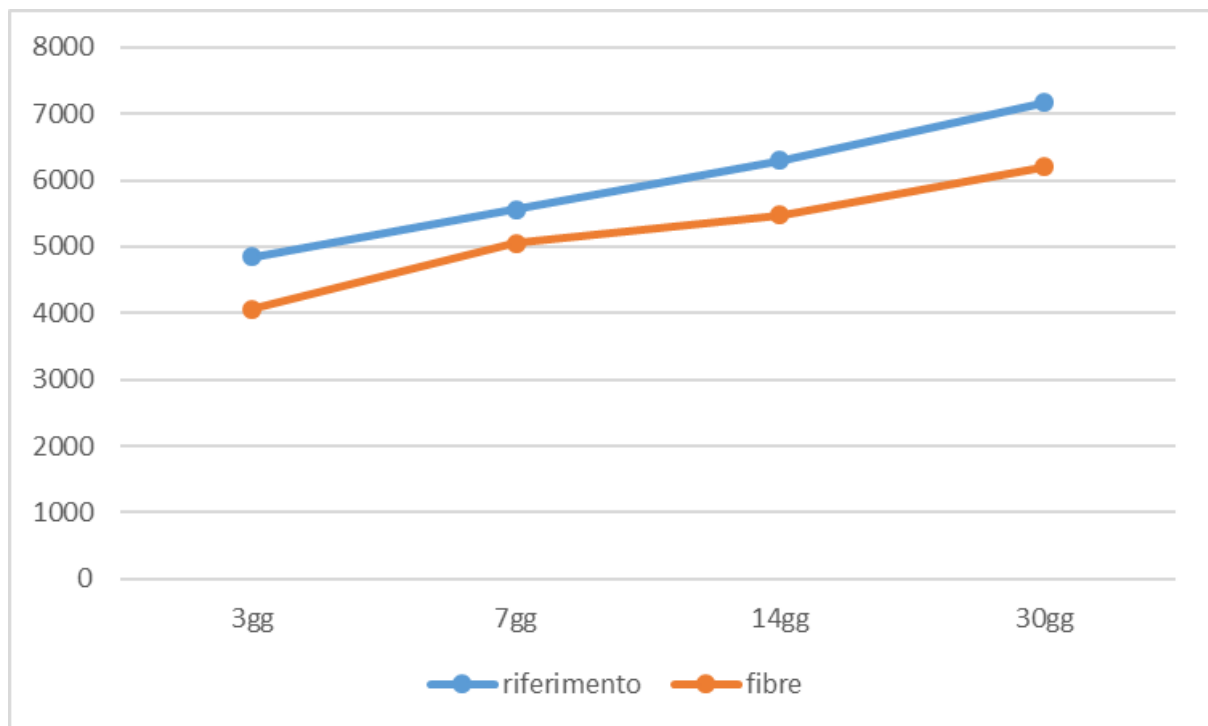


Figura 5.37 - Andamento valori ITSM nel tempo

Dal confronto tra i valori del modulo di rigidezza delle due diverse famiglie, è evidente una tendenza di crescita del modulo con l'aumentare del grado di maturazione del cemento presente nell'impasto.

Confrontando le 2 famiglie si evince che a ogni grado di maturazione la miscela senza fibre è più rigida rispetto a quella con le fibre.

5.3.4 Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

Il confronto viene rappresentato nel seguente grafico, in cui viene anche indicato il limite di normativa:

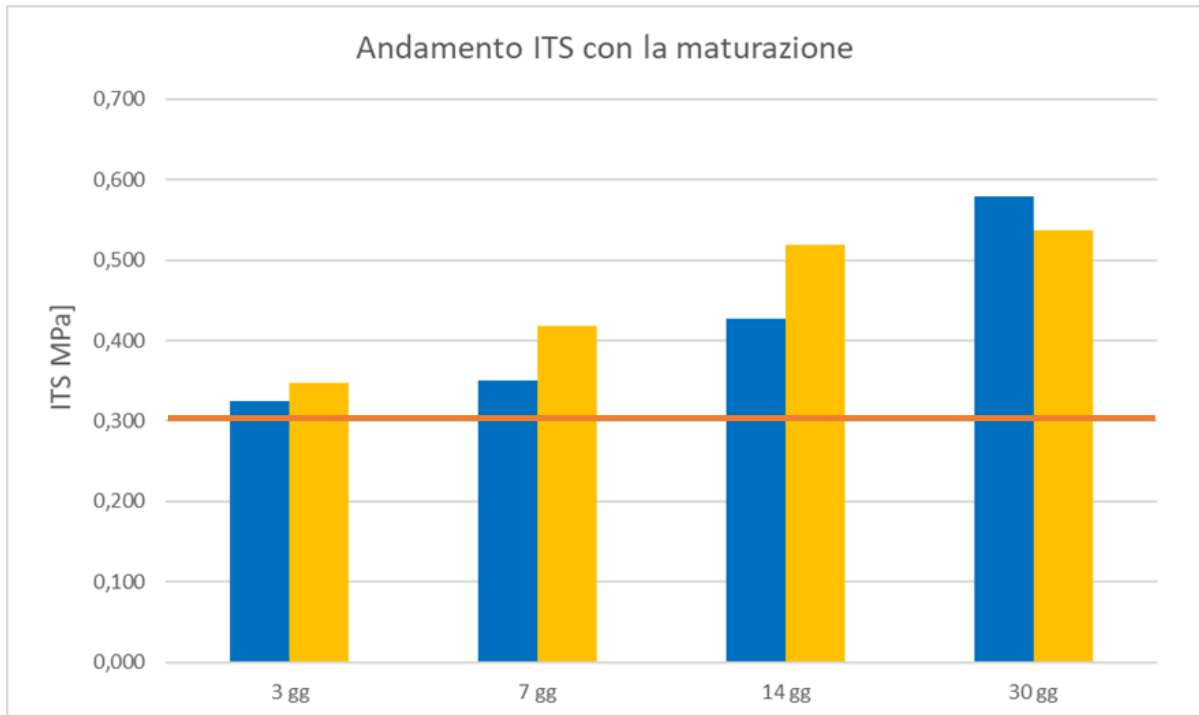


Figura 5.38 - Riepilogo e confronto valori ITS

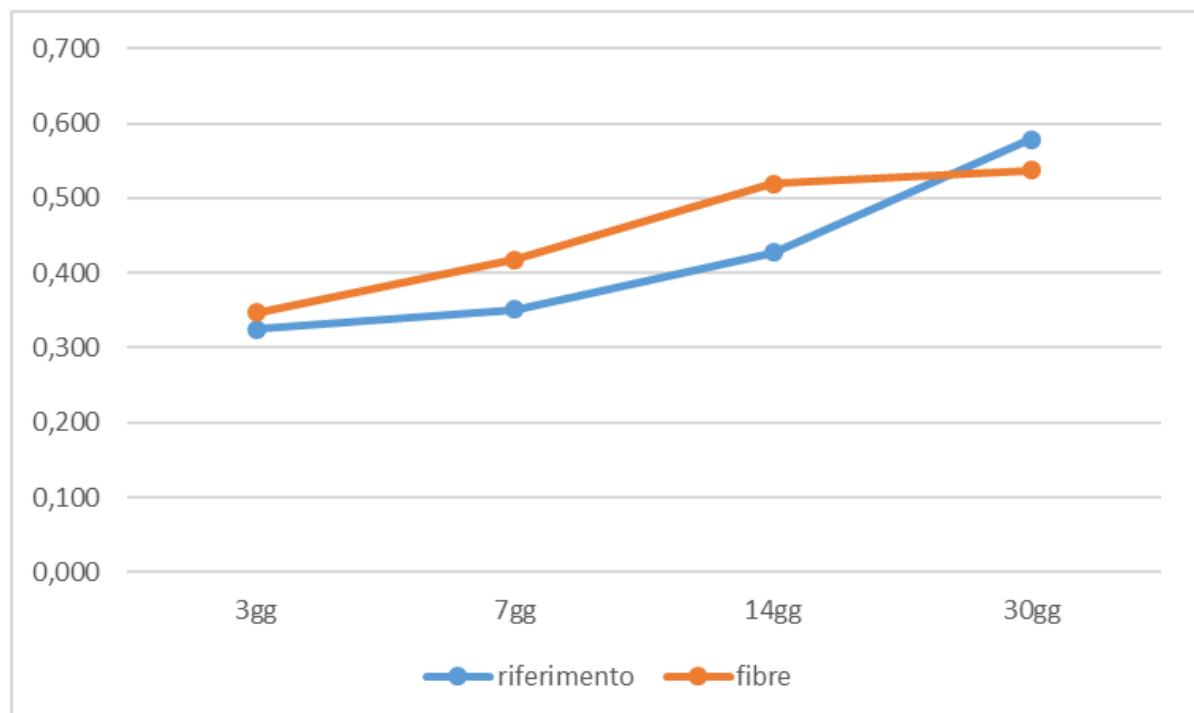


Figura 5.39 - Andamento ITS nel tempo

Confrontando i risultati delle prove di rottura ITS delle due famiglie di miscele, si nota un trend evolutivo complessivo crescente all'aumentare del grado di maturazione. Inoltre, la differenza tra le due famiglie risiede nel fatto che quella con le fibre arriva prima all'asintoto, questo perché le fibre assorbono più velocemente l'acqua.

5.3.5 CTI ed Energie

	RIFERIMENTO				FIBRE			
	CTI	E _{TOT}	E ₁	E ₂	CTI	E _{TOT}	E ₁	E ₂
3gg	4,17	14,73	5,92	8,81	3,96	27,55	8,87	18,68
7gg	4,37	18,41	6,49	11,92	3,58	35,73	11,71	24,02
14gg	5,34	19,78	7,32	12,46	3,92	45,87	14,50	31,37
30gg	6,59	23,36	9,56	13,80	4,38	43,55	13,77	29,79

Tabella 5.36 – Riepilogo CTI ed energie

5.3.6 Sensibilità all'acqua

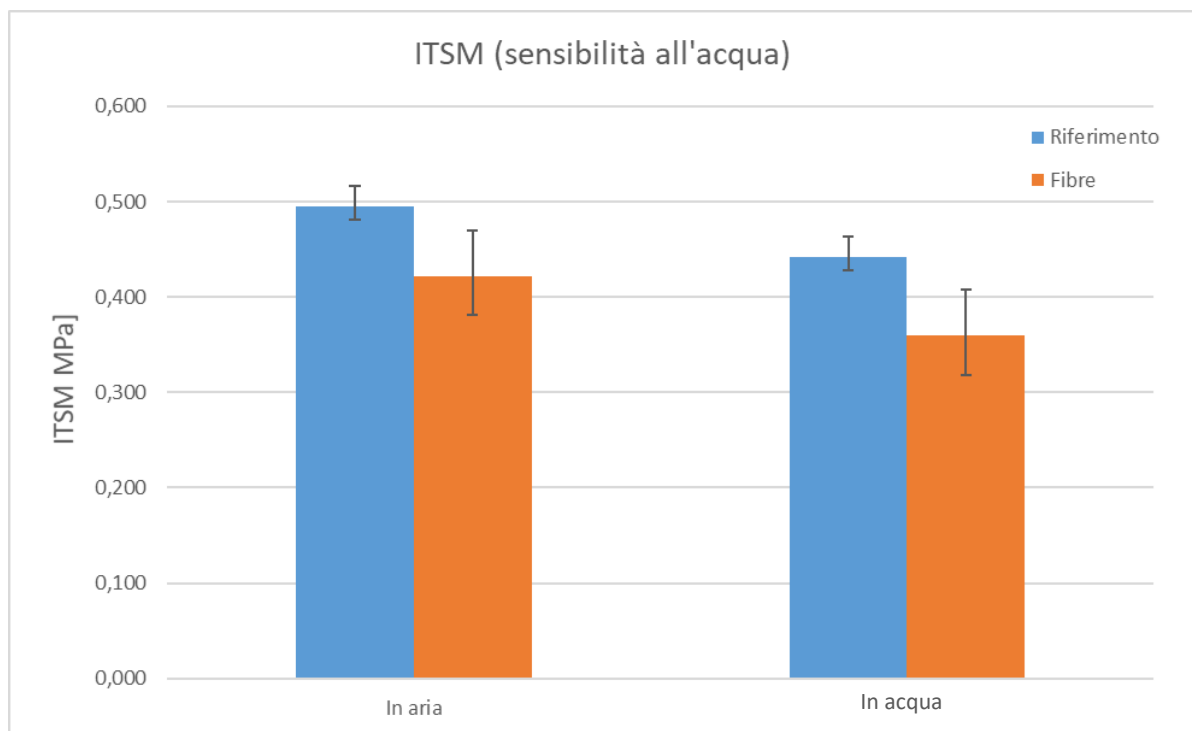


Figura 5.40 - Confronto ITS per Sensibilità all'acqua delle due famiglie

Vengono inoltre riportati i valori dell'ITS ratio.

RIFERIMENTO	ITSr
	[MPa]
	0,89

Tabella 5.37 - Riepilogo ITS ratio Riferimento

FIBRE	ITSr
	[MPa]
	0,85

Tabella 5.38 - Riepilogo ITS ratio Fibre

Dai risultati si nota che le due miscele sono entrambe sensibili all'acqua e ciò lo si riscontra dalla differenza tra i valori di rottura ITS in aria e in acqua.

Capitolo 6 - Conclusioni

La sperimentazione oggetto della tesi, condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche, è stata svolta al fine di studiare le prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo (Cold Recycled Mixtures, CRM) al variare della presenza o meno di fibre polimeriche.

Per ogni famiglia sono stati realizzati 22 provini di diametro 150 mm. Sui provini sono state eseguite prove di:

- Modulo di rigidezza a trazione indiretta ITSM dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITSr per valutazione della Sensibilità all'acqua

Dall'analisi dei risultati è stato possibile trarre le seguenti considerazioni:

- L'impiego di fibre nel confezionamento di conglomerati bituminosi riciclati a freddo comporta un minor grado di compattazione rispetto al caso senza fibre, il che è confermato dai più bassi valori dei vuoti dei provini confezionati;
- La sensibilità all'acqua non è influenzata significativamente dalla presenza o meno delle fibre;
- In generale, le 2 famiglie di miscele hanno un trend crescente in termini di ITS e ITSM all'aumentare del grado di maturazione della miscela;
- Nelle prove ITSM si nota che le miscele realizzate con fibre risultano meno rigide rispetto alle miscele senza fibre. Inoltre, nelle prove a rottura ITS si evince che le miscele con le fibre raggiungono valori più elevati di resistenza rispetto a quelle senza fibre; tuttavia, arrivano prima all'asintoto con la maturazione della miscela.
- La differenza sostanziale si ha anche nelle modalità di rottura ITS, dove i valori degli indici E_1 e E_2 sono notevolmente più elevati nel caso delle miscele con le fibre rispetto al riferimento.

Bibliografia e Sitografia

- [1] Ippoliti D. - "Influenza del tipo di emulsione sul livello prestazionale delle basi a freddo", 2021.
- [2] Foschi R. - "Breve storia del riciclaggio delle pavimentazioni", *Le strade*, n. 11, 2000.
- [3] M. Partl, L. Porot, H. Di Benedetto, F. Canestrari, P. Marsac, G. Tebaldi – "Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems". State-of-the-Art Report Volume 24 of the RILEM Technical Committee 237-SIB, 2018
- [4] Loprencipe G., Drago D. – Quaderno AIPCR "Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali" per il XXV Convegno Nazionale Stradale - Comitato Tecnico C 4.3 "Pavimentazioni stradali", Napoli 4-7 Ottobre 2006.
- [5] Castagnetta V. - "Il riciclaggio delle pavimentazioni bituminose stradali invecchiate", 1985.
- [6] Anas – "Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture, Volume V", 2019
- [7] Grilli A. - Cold mix asphalt used for base layers: an application work on the "variante" to the SP 424 in San Lorenzo in Campo (PU)
- [8] Vivar E., Haddock J. – "HMA Pavement Performance and Durability", 2006.
- [9] Sangiorgi C., Tataranni P., Simone A., Vignali V., Lantieri C., Dondi G. – "A laboratory and field evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement", 2017.
- [10] Rosa L. – "Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali", 2010.
- [11] Chen D. – "Evaluation of long-term performance of cold in place recycled asphalt roads", 2006.
- [12] Gesto - "Produzione economica di conglomerati a freddo con bitume schiumato", 1999.

- [13] Garofalo M. - "Riciclaggio a freddo con impianto mobile", Convention di CGS Group , 2009.
- [14] Ravaioli S. - "Emulsioni bituminose", Siteb, Prima edizione, Settembre 2004.
- [15] Kaloush K. – "Asphalt rubber: Performance tests and pavement design issues", 2014
- [16] Giannattasio F. - "Rigeneranti per il fresato", Le Strade, n. 1345, 1999
- [17] Viola P. – "Caratterizzazione avanzata in laboratorio di materie prime secondarie rigenerate o stabilizzate con emulsione di bitume e leganti cementizi", 2013
- [18] Xu J., Huang S., Qin Y., Li F. – "The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion stabilized Cold Recycling Mixtures", 2011.
- [19] Collepari M., Collepari S., Troli R. – "il nuovo calcestruzzo", 2014
- [20] MAHAC SRL- "Scheda tecnica fibre FORTA FI", 2021

Sitografia

- [S1] <https://www.ingenio-web.it/5848-le-pavimentazioni-stradali-flessibili-e-semirigide>
- [S2] <https://it.wikipedia.org/wiki/Ecosostenibilit%C3%A0>
- [S3] <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>
- [S4] Baliello A., Pasquini E., Giacomello G., Pasetto M., 2018,
<https://www.stradeeautostrade.it/asfalti-e-bitumi/materiali-marginali-nelle-miscelate-stradali/>
- [S5] <https://www.lavoripubblici.net/riciclaggio-freddo-emulsione-bituminosa/>
- [S6] <https://buildingcue.it/quello-che-non-si-vede-una-strada-strato-dopo-strato/9835/>
- [S7] <https://www.ecovie.it/base-riciclata-a-freddo-sai-di-che-si-tratta/>
- [S8] <https://www.ecovie.it/quali-sono-i-vantaggi-della-realizzazione-dello-strato-di-base-con-la-tecnica-del-riciclaggio-a-freddo/>
- [S9] <https://www.ecovie.it/pavimentazioni-stradali-strato-di-base-con-emulsione-bituminosa/>

Ringraziamenti

I più sentiti ringraziamenti a tutti coloro che hanno contribuito alla stesura di questa tesi, a loro va tutta la mia stima e gratitudine.

Desidero ringraziare in primis il mio relatore, Prof. Ing. Maurizio Bocci, per aver assecondato la mia richiesta ed avermi dato la possibilità di svolgere un'interessante sperimentazione su questo argomento. Inoltre, desidero ringraziarlo per la passione che è stato in grado di trasmettere durante i suoi corsi, chiave fondamentale per spingermi ad approfondire tale ambito.

Desidero inoltre ringraziare l'Ing. Carlo Carpani e l'Ing. Emiliano Proserpi che, con grande pazienza, mi hanno assistito nelle varie fasi della sperimentazione e mi hanno fornito il supporto morale e l'aiuto necessario per concludere questo lavoro. A loro va il mio più caro augurio per una splendida carriera.

Ringrazio i colleghi con cui ho condiviso questo percorso, su tutti Marco, Edinson e Matteo: le gioie ed il reciproco aiuto accademico e psicologico non verranno mai dimenticati. Il mio più grande in bocca al lupo per la vostra carriera.

Un vero e sincero grazie va, soprattutto, ai miei familiari, ai miei genitori, i miei nonni e soprattutto a mia madre, che ha condiviso con me tutti i momenti negativi e positivi e mi ha sempre supportato: avete creduto in me molto più di quanto io abbia mai fatto e se ho raggiunto questo traguardo lo devo principalmente a voi.

Un grazie gigantesco va a tutti gli amici conosciuti durante questa tappa della mia vita e anche al di fuori dell'ambito accademico che ci sono sempre per me..... siete persone straordinarie, vi voglio bene.