UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Efficacia delle fibre di rinforzo nei conglomerati bituminosi riciclati a freddo

Effectiveness of reinforcement fibers in cold recycled asphalt mixture

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Emiliano Prosperi

Tesi di Laurea di:

Matteo Giuliani

Anno Accademico 2020 – 2021

Sommario

Capitolo 1 - Introduzione 1

Capitolo 2 - Stato dell'arte 3

2.1 La strada nel corso dei secoli 3

2.2 Stratigrafia stradale 4

2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso 4

2.3.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso 7

2.4.1 Tecniche di riciclaggio 11

2.5.1 In impianto 12

2.5.2 In situ 15

2.6.1 In impianto 18

2.6.2 In situ 20

2.6.2.2 Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive 24

2.6.3 Variazione dosaggi dei materiali della miscela 28

2.6.3.1 Emulsione bituminosa 28

2.6.3.2 Granulometria RAP e cemento 29

2.6.3.3 Emulsione bituminosa e filler 31

2.6.3.4 Acqua 33

2.7 Requisiti di capitolato ANAS 33

2.7.1 Materiali inerti 33

2.7.2 Leganti e additivi 34

2.7.3 Miscela 34

2.7.4 Requisiti di accettazione 35

2.7.4.1 Studio preliminare 36

Capitolo 3 - Materiali 38

3.1 RAP 38

3.2 Filler calcareo 41

3.3 Emulsione Bituminosa 43

3.3.1 ***Emulsione Modificata con Polimeri SBS – RIGEVAL CM*** 46

3.4 Cemento Portland 47

3.4.1 Idratazione, presa e indurimento 48

3.4.1.1 Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento ... 49

3.4.2 Proprietà e ruolo del cemento nella pavimentazione 50

3.5 Acqua 51

3.5.1 Ruolo dell'acqua 51

3.6 Fibre 53

3.6.1 Prestazioni del conglomerato bituminoso con FORTA FI 57

Capitolo 4 - Metodi di prova e Programma Sperimentale 63

4.1 Apparecchiature e protocolli di prova 63

4.1.1 Analisi granulometrica 63

4.1.2.1 Procedura per aggregati di pezzatura 4 mm – 31,5 mm 68

4.1.2.2 Procedura per aggregati di pezzatura 0,063 mm – 4 mm 69

4.1.3 Preparazione dei provini 71

4.1.4 Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31) 76

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) 83

4.1.7 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23) 95
4.1.7.1 Sensibilità all'acqua 98
4.1.7.2 Coefficiente CTI ed energie 99
4.1.8 Prova di determinazione Modulo Complesso a Compressione ... 100
4.1.8.1 Preparazione dei provini 102
4.1.8.2 Parametri di prova 105
4.1.9 Determinazione della curva maestra 112
4.1.9.1 Principio di sovrapposizione tempo temperatura 112
4.1.9.2 Modello generale 2S2P1D 114
4.1.9.3 Rappresentazione grafica 115
4.1.10 Prova a fatica (UNI EN 12697-24) 116
4.2 Programma Sperimentale 121
4.2.1 Fase preliminare 121
4.2.1.1 Classificazione del materiale 121
4.2.1.2 Elaborazione dei dati del picnometro 124
4.2.1.3 Miscele di prova 126
4.2.2 Scelta della miscela definitiva 131
4.2.3 Seconda fase 132
4.2.3.1 Codifica provini 132
Capitolo 5 - Analisi dei risultati 137
5.1 Riferimento 137
5.1.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità 138
5.1.1.1 Impasto CR 139
5.1.1.2 Impasto DR 140
5.1.1.3 Impasto ER 141
5.1.1.4 Impasto GR 142

5.1.2 Perdita di acqua 142
5.1.2.1 Impasto CR 142
5.1.2.2 Impasto DR 143
5.1.2.3 Impasto ER 143
5.1.3 Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) 143
5.1.4 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS) 145
5.1.4.1 Calcolo CTI ed energie 145
5.1.4.1.1 Provini a 3 gg 146
5.1.4.1.2 Provini a 7 gg 147
5.1.4.1.3 Provini a 14 gg 148
5.1.4.1.4 Provini a 30 gg 149
5.1.5 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS 150
5.1.6 Prove di Fatica 151
5.1.7 Prove di Modulo Complesso a Compressione e Curve Maestre .. 152
5.1.7.1 Provino BR VI 152
5.1.7.2 Provino BR VII 154
5.1.7.3 Provino FR VIII 156
5.1.7.4 Confronto delle Curve Maestre 159
5.2 Fibre 161
5.2.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità 162
5.2.1.1 Impasto AF0,2 162
5.2.1.2 Impasto BF0,2 163
5.2.1.3 Impasto CF0,2 164
5.2.2 Perdita di acqua 165
5.2.2.1 Impasto AF0,2 165
5.2.2.2 Impasto BF0,2 165

5.2.2.3 Impasto CF0,2 165

5.2.3 Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) 166

5.2.4 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS) 167

5.2.4.1 Calcolo CTI ed energie 167

5.2.4.1.1 Provini a 3 gg 168

5.2.4.1.2 Provini a 7 gg 169

5.2.4.1.3 Provini a 14 gg 170

5.2.4.1.4 Provini a 30 gg 171

5.2.5 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS 172

5.2.6 Prove di Fatica 172

5.2.7 Prove di Modulo Complesso a Compressione e Curve Maestre .. 174

5.2.7.1 Provino BF0,2 V 174

5.2.7.2 Provino BF0,2 VI 176

5.2.7.3 Provino BF0,2_VII 179

5.2.7.4 Confronto delle Curve Maestre 181

5.3 Confronto tra le famiglie 183

5.3.1 Parametri di lavorabilità 183

5.3.2 Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) 184

5.3.3 Rottura a Trazione Indiretta (ITS) 185

5.3.4 CTI ed energie 186

5.3.5 Sensibilità all'acqua 186

5.3.6 Prove di Fatica 187

5.3.7 Modulo Complesso a Compressione e Curve Maestre 188

Capitolo 6 - Conclusioni 190

Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia i

Ringraziamenti iii

Capitolo 1 - Introduzione

L' aumento costante dello sviluppo economico dei giorni nostri, e del conseguente aumento dei trasporti, ha comportato un aumento del traffico veicolare, in particolare del traffico dei veicoli pesanti, causa principale del degrado delle pavimentazioni stradali. Queste ultime sono costituite da vari strati sovrapposti, aventi materiali e spessori diversi. Il loro obbiettivo è quello di sopportare le azioni indotte dal traffico, trasmetterle e distribuirle al terreno su cui poggiano, detto sottofondo.

Spesso sono necessari interventi di ripristino e manutenzione, in particolare quando l'infrastruttura non è più in grado di comfort e sicurezza. Questi interventi prevedono un rifacimento della pavimentazione, con precedente demolizione totale o parziale della pavimentazione esistente. Da queste lavorazioni si ottiene il "RAP" o "fresato", che sarebbe il conglomerato bituminoso demolito, che in assenza di apposite prescrizioni viene trasportato in discarica e trattato come rifiuto speciale.

Negli ultimi anni, con l'aumento della sensibilità al tema ambientale e dell'ecosostenibilità, si punta a riutilizzare le materie prime e preservare le risorse naturali per le generazioni future.

Anche la ricerca in campo stradale persegue l'obbiettivo di raggiungere una maggiore ecosostenibilità. La sperimentazione descritta in questa tesi, si pone l'obbiettivo di avere una maggiore conoscenza prestazionale di recenti tecnologie per il risanamento stradale, cercando proprio di porsi nella direzione della sostenibilità ambientale.

Nei prossimi capitoli, infatti, si analizzeranno i risultati prestazionali forniti da un conglomerato, 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 nuovo materiale, dovuta alla presenza o meno 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 rigidezza a trazione indiretta (ITSM)
- Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)
- Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS
- Valutazione del coefficiente CTI
- Prove di Fatica
- Prove di Modulo Complesso a Compressione

I risultati ottenuti da ogni prova, suddivisi per famiglia di materiale, sono poi stati successivamente commentati.

La presente tesi si sviluppa in sette capitoli:

- Capitolo 1 – Introduzione
- Capitolo 2 – Stato dell'arte:

Vengono affrontati i problemi delle pavimentazioni e quelli di carattere ambientale. Viene descritto il riciclaggio delle pavimentazioni, con particolare attenzione al riciclaggio a freddo, elencandone vantaggi e svantaggi.

- Capitolo 3 – Materiali:

Vengono illustrati i materiali utilizzati e le loro caratteristiche.

- Capitolo 4 – Metodi di prova 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 7 – Bibliografia e Sitografia

Capitolo 2 - Stato dell'arte

2.1 La strada nel corso dei secoli

La strada è un'infrastruttura di trasporto destinata alla circolazione dei veicoli su ruota e marginalmente a pedoni ed animali.

Le tecnologie di costruzione di una strada si sono sempre più evolute con il passare del tempo. L' inizio dello sviluppo di questa tecnologia fu dato dai Romani che, per esigenze militari e commerciali, si concentrarono nello sviluppo di strade che permettessero il collegamento tra i vari punti dell'impero in tempi brevi. Nel loro sviluppo cercarono sempre di perseguire come obbiettivo una infrastruttura con buon livello di affidabilità, durabilità e percorribilità. Proprio grazie a questo primo sviluppo viene introdotto il termine "strata", vale a dire una infrastruttura realizzata come insieme di strati sovrapposti e si notò che questo tipo di configurazione garantiva adeguati livelli di portanza, regolarità e vita utile.

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.

Oggigiorno una struttura di una strada tipo è la seguente: lo strato più superficiale, e cioè quello immediatamente a contatto con lo pneumatico, deve garantire regolarità, aderenza e minima rumorosità assicurando condizioni di sicurezza e comfort ai veicoli. Gli strati immediatamente più in basso, invece hanno la funzione di sopportare i carichi veicolari e distribuirli riducendone l'intensità in modo tale da scaricare al sottofondo stradale un carico notevolmente attenuato. Le miscele, con cui vengono realizzati gli strati, possono essere costituite da materiali granulari, i quali comprendono pietrisco e ghiaia e trasmettono i carichi applicati in profondità, o materiali legati che generano, al di sotto dell'impronta di carico, sollecitazioni di trazione nella metà inferiore dello strato e di compressione nella metà superiore.

2.2 Stratigrafia stradale

Come già accennato la strada è una infrastruttura multistrato, composta da diversi strati di vario materiale e spessore che appoggiano sul sottofondo.

Una pavimentazione stradale deve ricercare due fondamentali obbiettivi: sicurezza e comfort di marcia per gli utenti. Per perseguire ciò è necessario realizzare sovrastrutture che siano in grado di:

- Garantire un'adeguata portanza, ovvero distribuire i carichi di traffico, opportunamente attenuati al sottofondo.
- Devono resistere ai fenomeni di degrado strutturale, almeno per una vita utile di 20 anni
- Devono fungere da protezione per lo stato di sottofondo, che può risentire degli effetti degli agenti atmosferici, soprattutto per quanto riguarda la penetrazione di acqua e gelo
- Garantire regolarità del piano viabile e quindi confort per gli utenti.

Negli ultimi anni lo sviluppo dei mezzi e il loro aumento in numero, ha portato ad uno sviluppo della sovrastruttura stradale che si è trovata ad affrontare sempre più carichi maggiori, portando ad un deterioramento maggiore. Sono stati quindi introdotti materiali sempre più performanti.

2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

Le tipologie di pavimentazioni sono tre: ci sono quelle rigide, semirigide e flessibili. Una pavimentazione semirigida, che sarebbe l'argomento oggetto di questo elaborato, è composta dai seguenti strati:

- **Strato d' usura, o tappeto (3-6 cm):** è lo strato della pavimentazione più superficiale. Il suo compito principale è quello di garantire sicurezza e comfort agli utenti, attraverso la regolarità superficiale, che viene raggiunta utilizzando aggregati che possiedono elevate caratteristiche di aderenza, rugosità e resistenza alle azioni tangenziali. (Vivar, 2006, [1]).

- **Strato di collegamento (Binder) (6-8 cm):** ha una funzione di collegamento tra strato di usura e base.

a) **Strato di Base (8-30):** il suo obbiettivo principale è l'assorbimento delle sollecitazioni flessionali indotte dai carichi, quindi ha una funzione del tutto strutturale. Quindi lo spessore di questo strato è molto variabile e dipende da caratteristiche del sottofondo, dal clima e dalla quantità di traffico presente. Questo strato può essere realizzato in diversa maniera: misto cementato, 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 differenza con gli strati superiori è che la dimensione massima degli aggregati è maggiore e la percentuale di bitume è ridotta. *(Anas, Quaderni Tecnici Volume V, 2019, [2])*.

- **Strato di Fondazione (15-35 cm):** lo scopo principale di questo strato è strutturale, infatti il suo compito è quello di trasferire i carichi al sottofondo. Solitamente è realizzato in misto granulare, quindi non legato. Negli ultimi anni per venire incontro alle esigenze sulle tematiche ambientali e di ecosostenibilità, si è sviluppata anche per questo strato, la tecnica del riciclaggio a freddo, attraverso l'utilizzo di un'emulsione, senza avere eccessive perdite prestazionali. (Sangiorgi C., 2017, [3])
- **Sottofondo (50-100 cm):** costituisce il piano di posa della fondazione. Come obbiettivo principale ha quello di generare una buona portanza, che è necessaria per la stabilità di tutti gli strati superiori.

2.3 Ecosostenibilità ed economia circolare

Negli ultimi decenni, con l'aumento della popolazione e dell'inquinamento e la diminuzione delle risorse, si è sempre più sviluppato il concetto dell'ecosostenibilità, che si basa sul rinnovamento delle risorse: ovvero consumare un quantitativo di risorse non superiore a quelle prodotte dal pianeta. [S1].

Alla base del concetto di ecosostenibilità, 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 *[S2]*. Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico.

Questo tipo di economia può essere rappresentata dalla figura 2.1:

Figura 2.1 – Schema di funzionamento dell' Economia Circolare

Si possono riassumere le fasi di un'economia circolare nel seguente modo:

- Progettazione: nel momento della progettazione bisogna già considerare il riutilizzo dei materiali a fine vita, e quindi garantire facilità dello smontaggio e della possibilità di ristrutturazione.
- Modularità e versatilità del prodotto, per adattarsi alla variazione 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: se possibile bisogna utilizzare il più possibile materiale riciclato, senza andare ad intaccare le prestazioni adeguate. Questo è molto utile per ridurre le emissioni di CO_2, che si generano per ricavare le materie prime.

Mentre invece il tradizionale modello economico lineare, è fondato invece sul tipico schema "estrarre, produrre, utilizzare e gettare".

A seguito della grande sensibilizzazione che negli ultimi anni si è sviluppata anche a livello istituzionale, e infatti a febbraio 2021 il Parlamento Europeo ha votato per il nuovo piano d'azione per l'economia circolare, chiedendo misure aggiuntive per raggiungere un'economia a zero emissioni di carbonio.

Anche nell'ambito dell'edilizia ed architettura, l'ecosostenibilità è diventato un argomento fondamentale, e si cerca di progettare con materiali a basso impatto o con materiali ricavati da demolizioni di altri edifici.

Questa tesi è orientata nella medesima direzione trattando specificamente uno studio sulle caratteristiche prestazionali di pavimentazioni realizzate con la tecnica del riciclaggio a freddo, che prevede il riutilizzo del 100% della pavimentazione precedentemente demolita.

2.3.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

Anche in ambito stradale, attraverso la ricerca, si sta perseguendo questo obbiettivo di recuperare le materie prime per la costruzione da vecchie pavimentazioni demolite o dallo scarto ottenuto da materiali utilizzati nella produzione industriale. Le tecnologie, che grazie alla ricerca si sono sviluppate negli anni, sono caratterizzate dai seguenti materiali:

- Polverino di gomma
- Scorie nere
- Scorie bianche
- Scorie da incenerimento
- RAP

Ora andiamo a descrivere questi materiali uno ad uno:

Il polverino di gomma viene ricavato dalla demolizione e recupero di pneumatici, ottenendo un grande risparmio sulle emissioni, poiché se non fossero recuperati, finirebbero in discarica o inceneriti. Il polverino viene utilizzato negli Asphalt Rubber,

ovvero viene aggiunto o al bitume o alla miscela. Altri studi hanno dimostrato che questi tipo di asfalti sono performanti come quelli con materie prime. *(Kaloush, 2014, [4])*.

Figura 2.2 - Polverino in gomma

Le scorie nere derivano da lavorazioni siderurgiche, e in particolare dai processi produttivi con fornaci ad arco elettrico. Questo è un materiale di scarto molto diffuso in Italia, che se non viene recuperato deve essere smaltito con elevati costi dal punto di vista economico e ambientale. Grazie a diversi studi si è notato come questo materiale possa tranquillamente sostituire l'aggregato; è bene utilizzarlo soprattutto negli strati di sottofondo e fondazioni o come aggregato di alta qualità negli strati legati a bitume. [S3].

Figura 2.3 - Scorie nere

Anche le scorie bianche derivano dall' industria siderurgica e vengono riutilizzate come integrazione al cemento o alla calce nei conglomerati in cui è presente il legante idraulico e nelle stabilizzazioni del sottosuolo.

Mentre le scorie da incenerimento provengono dall' incenerimento dei rifiuti, e, invece che essere portate in discarica, possono essere riutilizzate in ambito stradale per sostituire il filler o gli aggregati.

Il Reclaimed Asphalt Pavement, sarebbe quello che comunemente viene chiamato fresato, e viene ottenuto dalla demolizione di vecchie pavimentazioni. È facilmente riciclabile e può essere riutilizzato più volte ricavando sia aggregati che bitume da esso.

Figura 2.4 - RAP

2.4 il riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Come già accennato, a seguito di questa sensibilizzazione sul tema, il riciclaggio in ambito stradale è diventato l'obbiettivo principale della ricerca degli ultimi decenni. Nel passato, seguendo l'ideologia di economia lineare, una volta terminata la vita utile della strada, si demoliva e si costruiva una nuova strada utilizzando materiali nuovi. Questo atteggiamento ha come conseguenza il fatto di consumare materie prime non rinnovabili, come gli aggregati lapidei e bitume, e la produzione di un'elevatissima quantità di materiali di scarto, con relativi problemi di stoccaggio e trattamento.

Dopo anni di ricerca, oggi si sa che il materiale ottenuto da demolizione di una vecchia pavimentazione, ovvero il RAP (Reclaimed Asphalt Pavements), detto più comunemente fresato, può essere riciclato, utilizzandolo per la costruzione di nuove strade. I motivi che spingono ad abbracciare questo tipo di filosofia sono i seguenti:

- 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 dell'incenerimento dei rifiuti

- Conservazione dell'energia
- Vantaggi economici
- Vantaggi tecnici

In Italia, i primi approcci a questa filosofia, sono datati 1970, con la fresatura degli strati superficiali. Nel 1983 sono stati realizzati invece i primi lavori di riciclaggio in situ con impianti mobili e riutilizzo del 100% del materiale fresato.

Mentre, il primo approccio con il cosiddetto riciclaggio a freddo, ovvero con l'utilizzo di emulsioni bituminose e lavorazione a temperatura ambiente è avvenuto nel 1989. Lo sviluppo di questa tecnica è continuato fino ai giorni nostri, nel tentativo di perfezionarlo e ridurre il suo problema maggiore, che era quello di avere dei tempi di attesa molto lunghi prima della riapertura al traffico, che inizialmente erano di 3-4 giorni.

Nonostante la tecnica abbia subito molti miglioramenti sotto questo ed altri aspetti, in Italia è ancora poco sviluppata, ed infatti ad oggi solo il 15% del conglomerato bituminoso demolito viene recuperato e riutilizzato, e questo ci mette ad uno degli ultimi posti in Europa, nella classifica dei Paesi che utilizzano di più conglomerato bituminoso riciclato. Secondo studi sviluppati dall' AIPCR (comitato italiano dell'Associazione Mondiale della Strada), questa tendenza in Italia può dipendere dai seguenti fattori:

- Carenza di normativa tecnica di riferimento
- Legislazione inadeguata
- Scarsa conoscenza generale, dei vantaggi ottenibili da queste tecniche, anche a causa della modesta diffusione
- Un antico retaggio del passato per cui c' è la convinzione che materiali e tecniche di riciclaggio, siano più onerosi rispetto a quelli tradizionali. (*Foschi, 2000, [5]*)

Paese	Produzione annuale di conglomerati $t \cdot 10^6$	Produzione annuale di fresato $t \cdot 10^6$	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

Ovviamente, incentivare questo tipo di tecnica, porterebbe dal punto di vista ambientale a prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- 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

Per specificare quest' ultimo punto, c' è da sottolineare che ovviamente la soluzione migliore sarebbe poter fare riciclaggio in situ, ove possibile, in quanto è vantaggioso per tutti gli aspetti già analizzati in precedenza. Inoltre c' è anche il vantaggio di abbattere i costi dell'inquinamento ambientale ed i consumi energetici derivati dai continui trasporti tra cantiere ed impianto. Si guadagna anche in termini di tempistica ed efficienza, poiché i trasporti possono incontrare traffico o eventuali imprevisti. Invece, per quanto riguarda il riciclaggio a caldo, la soluzione meno inquinante è quella del riciclaggio in impianto.

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 agli scambi energetici presenti all'atto del 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 considera riciclaggio a caldo (HMA, Hot Mix Asphalt), quel tipo di lavorazione nella quale 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

Solitamente non si usa il 100% di aggregati e bitumi riciclati, e si fa uso di additivi, poiché a causa del cambio di proprietà del bitume dovuto all' invecchiamento, si avrebbe un materiale troppo rigido e fragile per poter fare una nuova costruzione. (Partl, 2018, [6])

Per generare le miscele si utilizzano impianti fissi di produzione; si riesce quindi ad ottenere un'elevata precisione dei dosaggi. Il riciclaggio a caldo è sicuramente migliore di quello a freddo a livello di prestazioni, ma allo stesso tempo non si riesce a reimpiegare tutto il conglomerato riciclato. La percentuale di riciclaggio raggiungibile dipende dal tipo di impianto e dalla configurazione adottata, le varie tipologie sono:

- Impianto discontinuo

È la tipologia di impianto più diffusa in Italia, come vantaggi ha quelli di godere di una maggiore flessibilità, di un miglior controllo di qualità del prodotto finito e di una minore produzione di fumi dovuti alla presenza del filtro. Mentre gli svantaggi sono quelli di avere una produttività più bassa e un procedimento più costoso a causa delle molte componenti necessarie.

Gli aggregati vergini, precedentemente vagliati e divisi in diverse pezzature, vengono posizionati all'interno di tramogge dette predosatori. Da qui si stabilisce il dosaggio e il materiale viene trasportato tramite un nastro ad un forno a tamburo rotante che funge da essiccatore. Il forno è diviso in 3 zone: nella prima gli inerti vengono scaldati ma non perdono umidità; nella seconda gli inerti perdono tutta l'umidità, essiccandosi, a temperatura costante; nella terza gli inerti essiccati aumentano temperatura (150-160°C) finché il materiale non esce dal cilindro. Da qui vengono trasportati alla torre di mescolazione tramite un elevatore a tazze. Il bitume, precedentemente stoccato in serbatoi metallici, viene riscaldato a 130-150°C e inviato e dosato nel mescolatore. Verificati i corretti dosaggi si attiva la miscelazione: in un recipiente, delle pale ruotano per 35-50 secondi e, tramite un'apertura sul fondo, il conglomerato viene convogliato in delle tramogge di carico e quindi sugli automezzi.

- Modifica per il riciclaggio

In questo modo è più facile la modifica per l'inserimento del fresato, tenendo sempre conto che il fresato non deve attraversare la fiamma del bruciatore del cilindro essiccatore altrimenti si avrebbero problemi di cracking del bitume.

Esistono varie tipologie di soluzioni:

- Introduzione del riciclato a temperatura ambiente al piede dell'elevatore caldo. Si usa per percentuali di riciclaggio fino al 15-20%
- Introduzione del riciclato a temperatura ambiente nel cilindro essiccatore attraverso un apposito anello di riciclaggio. Si usa per percentuali fino al 35%
- Introduzione del riciclato a temperatura ambiente nella vasca di miscelazione. Si usa per percentuali fino al 20%
- Essiccazione e riscaldamento del riciclato a 110-130°C in un essiccatore dedicato e aggiunto agli inerti nuovi nella vasca di miscelazione. Si ottengono percentuali di riciclaggio del 50%.

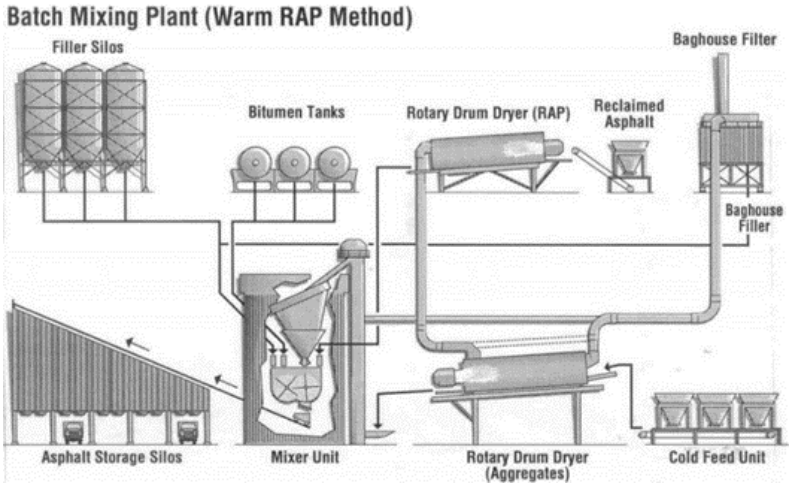

Figura 2.5 - Impianto discontinuo di riciclaggio a caldo con essiccatore dedicato per il fresato

Il RAP può essere introdotto nelle miscele a caldo fino ad un massino del 10% nello strato di usura e uno del 20% negli di strati di binder e base. Se dobbiamo inserire un quantitativo maggiore, dovremmo fare uno studio più approfondito. (*Loprencipe, 2006, [7]*)

- Impianto continuo

I vantaggi di questo impianto sono i costi minori, dovuto al fatto che non sono presenti le torri di miscelazione e il vaglio, e la produttività è maggiore. Gli svantaggi sono che il processo di miscelazione è meno controllato e quindi la qualità del prodotto è inferiore a quello discontinuo. Un' altra differenza + che il tamburo essiccatore è più grande, poiché al suo interno avvengono sia il processo di essicazione che di miscelazione.

Gli inerti entrano nel tamburo di miscelazione; si ha un aumento di temperatura a 77-82°C che porta alla perdita di umidità; aumenta la temperatura fono a 93°C e si ha l'introduzione del legante; si ha un rilascio di umidità che fa espandere il bitume e provoca un rapido rivestimento degli inerti; la temperatura continua ad aumentare fino a raggiungere quella di progetto e successivamente il conglomerato verrà scaricato.

- Modifica per il riciclaggio

In questo modo si riesce a recuperare molto di più rispetto a prima, quasi il 70% di fresato, e come prima il fresato non deve mai entrare in contatto con la fiamma del bruciatore per evitare l'ossidazione del bitume. Ci sono diverse modalità di introduzione del RAP nel cilindro essiccatore, il più utilizzato è quello a doppia alimentazione, in cui il fresato viene introdotto a metà cilindro e quindi il suo riscaldamento avviene per contatto con gli aggregati vergine già riscaldati.

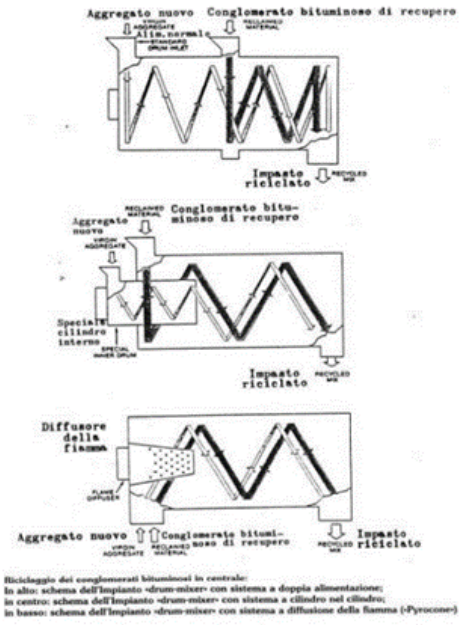

Figura 2.6 - Diverse modalità di introduzione del RAP nel cilindro essiccatore

2.5.2 In situ

Il riciclaggio a caldo in situ era una procedura che veniva molto utilizzata in passato per la costruzione degli stati di base. Oggigiorno, questa tecnica non viene più utilizzata poiché è molto inquinante, a causa delle grosse emissioni prodotte, e quindi a causa

della sensibilizzazione degli ultimi anni, questo svantaggio è molto grosso rispetto al vantaggio dal punto di vista prestazionale, nonostante questo sia molto elevate.

Altro grosso svantaggio di questa tecnica, è che può essere utilizzata fino ad una profondità di circa 5-6 m, quindi la tecnica risulta inutilizzabile 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.

La tecnica presenta alcuni vantaggi:

- Forte riduzione dei movimenti dei mezzi di trasporto con conseguente riduzione dei costi e del disturbo al traffico;
- Riduzione del consumo di combustibile nella fase di preriscaldamento degli aggregati per togliere l'umidità;
- Risparmio sui costi di trattamento del materiale fresato, che altrimenti si configura come rifiuto speciale;
- Minor uso di bitume nuovo rispetto al riciclaggio in impianto fisso (Foschi, 2003, [8])

Il riscaldamento della superficie della pavimentazione comporta una scarifica molto facilitata che non va a modificare la granulometria degli aggregati presenti.

La tecnica non viene più utilizzata, oltre che per l'inquinamento, come già detto, anche per la scomodità di dover fare una correzione granulometrica in situ.

2.6 Riciclaggio a freddo

Come si può intuire, in questo tipo di tecnica il RAP non viene riscaldato ma inserito a temperatura ambiente.

Come prima fase il materiale viene demolito mediante la cosiddetta fresatura "a freddo", che, è più innovativa rispetto a quella "a caldo", perché permette di mantenere una maggiore lavorabilità del materiale.

Figura 2.7 - Esecuzione di fresatura a freddo

Il fatto che questo tipo di tecnica non preveda in alcuna fase il riscaldamento del materiale, ovviamente comporta un grosso risparmio dal punto di vista economico, ambientale ed energetico.

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

- Materiale di recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- Legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato;
- 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
- Cemento (Castagnetta, 1985, [9])

La caratteristica su cui porre più attenzioni è sicuramente la determinazione delle caratteristiche del fresato, da cui dipende la quantità e la qualità degli altri elementi della miscela.

Ci sono diverse tecniche per quanto riguarda il riciclaggio a freddo, che possono essere applicate a diverse profondità:

- Depolverizzazione – miglioramento di strade inghiaiate non asfaltate

In questa tecnica si ricicla la ghiaia presente per costruire un manto superficiale sottile, utile per impermeabilizzare, depolverare e migliorare l'aderenza della pavimentazione.

In questa tecnica la ghiaia viene fissata alla pavimentazione tramite bitumatura, ovvero o utilizzando un'emulsione bituminosa o bitume schiumato. Questo tipo di intervento agisce ad una profondità tra i 10 e i 15 cm.

- Riciclaggio superficiale

Questa tecnica viene utilizzata nei casi in cui la fondazione è solida e ci sono dei punti deboli superficiali sulla pavimentazione, e quindi nei casi in cui probabilmente i requisiti di portanza sono ancora sufficienti. Quindi questa tecnica punta ad eliminare i punti deboli e migliora il piano viabile in termini di transibilità. Generalmente si svolge tra gli 8 e i 15 cm.

- Riciclaggio in profondità

Questa è sicuramente la tecnica più diffusa in Italia ed è anche quella affrontata in questa tesi. Consiste nell' effettuare un intervento strutturale di demolizione e ricostruzione a profondità superiori ai 15 cm, che spesso va anche a migliorare le caratteristiche del precedente strato. Questa tecnica non può essere utilizzata per gli strati più superficiali (binder ed usura) ed in Italia si utilizzano principalmente conglomerati a caldo.

2.6.1 In impianto

Il riciclaggio a freddo è preferibile in impianti fissi, ma esistono anche soluzioni "semoventi" che possono essere posizionate all' interno del cantiere, con l'ovvio vantaggio di ridurre i costi e l'inquinamento dovuto al trasporto del fresato. Nonostante l'impianto sia in cantiere, è possibile fare un preciso dosaggio delle varie componenti della miscela e si possono produrre 100-150 ton/ora.

Ci sono due tipi di impianti: discontinuo e continuo. La differenza è che nel primo caso vengono prima pesati gli inerti e il legante e in un secondo momento vengono inviati al ciclo produttivo. Nel caso di impianto continuo, invece, l'immissione dei materiali è continua, questo comporta il vantaggio che il processo è molto più veloce ma meno preciso nei dosaggi.

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.

Figura 2.8 - Impianto per la produzione di conglomerato a freddo

Quindi, appena arrivato in cantiere, il fresato, viene frantumato e riselezionato. In un secondo momento, si studia la curva granulometrica del fresato, e poi aggiungere degli aggregati vergini per correggerne la curva. RAP e aggregati vergini 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 viene direttamente caricato sui mezzi e portato in cantiere.

2.6.2 In situ

2.6.2.1 Vantaggi e Svantaggi

Come già detto, per quanto riguarda il riciclaggio a freddo, l'impianto in situ porta diversi vantaggi tra cui:

- 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, materiale con cui viene generalmente costruito uno strato di base. (Chen, 2006, [10])

- 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

In questa prima tecnica il bitume viene scaldato a 160-180 °C e viene messo in una camera di espansione a contatto con acqua a temperatura ambiente, solitamente con un dosaggio del 2%. Nel momento in cui il bitume e l'acqua entrano in contatto si ha una reazione che genera vapore, che aumenta il volume, creando una schiuma, costituita da bolle di vapore, ricoperta da una pellicola di bitume. A seconda del tipo di bitume utilizzato e del quantitativo di acqua, si potrà avere un aumento di volume tra 15 e 20 volte. (Gesto, 1999, [11]). L' aumento di volume comporta anche un aumento di superficie specifica che favorisce il legame tra il bitume e la frazione fine degli aggregati, creando una malta che si va a legare con gli aggregati più grandi. Tutto questo processo migliora la lavorabilità degli inerti.

Il bitume schiumato è caratterizzato da due parametri:

- Il rapporto di espansione: è il rapporto tra il volume massimo del bitume allo stato espanso e quello allo stato originario
- Tempo di semi trasformazione: tempo necessario affinché la schiuma si depositi, fino a raggiungere la metà del volume massimo ottenuto. (Garofalo, 2009, [12]).

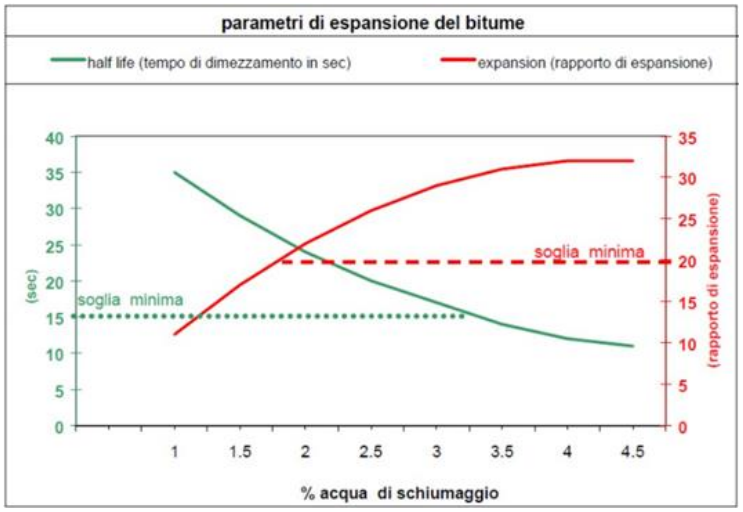

Figura 2.9 - Rapporto di espansione e tempo di semitrasformazione

Come abbiamo detto i parametri dipendono principalmente dal tipo di bitume, in particolare quelli più morbidi e viscosi sono quelli che riescono a produrre più schiuma, mentre quelli più duri si utilizzano solo a temperature elevate. (Gesto, 1999, [11]).

A questo punto il bitume espanso appena prodotto, viene aggiunto, con un dosaggio del 3-5% rispetto alla massa degli inerti, del materiale fresato, del cemento e dell'acqua. Quindi si ha un processo di miscelazione molto energico e rapido, in modo da evitare il decadimento della schiuma di bitume. In seguito la miscela viene immediatamente messa in opera e compattata.

I vantaggi nell'utilizzo del bitume schiumato sono (Rosa, 2010, [13]):

- 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 sono determinati tipi di bitumi.
- Necessità di disporre di bitume caldo, a circa 180°.

2.6.2.1.2 Emulsione bituminosa e cemento

In quest' altro caso al fresato viene aggiunto prima il cemento e poi una miscela di bitume, acqua ed emulsionanti, con l'obbiettivo di garantire coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato.

Le emulsioni hanno solitamente una composizione del 60% bitume e 40% acqua e vengono dosate nell' impasto con una percentuale del 4% circa rispetto alla massa degli inerti.

I vantaggi sono:

- 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 (Grilli, [7]).

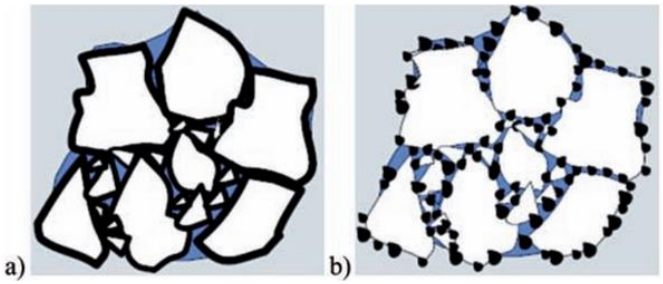

Figura 2.102 - Ricopertura degli aggregati nel caso di impiego di emulsione bituminosa a) e di bitume schiumato b)

- 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°C;

o Necessità di una bassa umidità atmosferica.

2.6.2.2 Treno di riciclaggio: composizione e modalità esecutive

Il treno di riciclaggio è un insieme di macchine operatrici semoventi, solitamente disposte in fila indiana, che si differenziano a seconda del tipo di intervento che dobbiamo fare. A titolo di esempio, si riporta un treno di riciclaggio con emulsione bituminosa, che è composto da:

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

La cisterna d' acqua può anche essere non prevista, ma diventa necessaria se nel processo viene utilizzato il bitume schiumato o cemento/calce oppure quando si richiede l'immissione di acqua aggiunta.

Per quanto riguarda la fresa, il suo compito è quello di demolire la pavimentazione fino alla profondità desiderata. Il risultato di questa operazione è il fresato, che viene posto sul lato della strada, e viene poi raccolto e caricato nella macchina mescolatrice, e impastato con emulsione o schiuma di bitume, acqua e altri additivi, e poi viene steso e compattato.

Oggigiorno, questa tecnologia del treno di riciclaggio, in cui si utilizzano due macchine distinte per fresare e per miscelare, sono state sostituite da un sistema single unit composto da una riciclatrice specializzata che esegue il compito della fresa e della mescolatrice contemporaneamente.

Figura 2.11 - Riciclatrice specializzata a freddo

Le riciclatici, che si sono molto sviluppate negli anni, sono in grado risanare le pavimentazioni, fino ad una profondità di 30 cm in un'unica passata. Questo fa si che siano macchinari molto efficienti ma anche molto ingombranti. La parte fondamentale della macchina è il tamburo, ovvero un cilindro rotante dotato "denti", che sarebbero utensili da taglio in acciaio temprato che ruotando fresano la pavimentazione stradale ammalorata. La rotazione avviene in senso antiorario rispetto alla direzione di trattamento della pavimentazione.

Figura 2.12 - Tamburo di fresatura

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

- Spandi cemento 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 2.13 - Treno di riciclaggio a freddo con riciclatrice

Come già detto, ogni treno di riciclaggio è diverso dall' altro e dipende principalmente dall' applicazione che vogliamo assegnare e dal tipo di stabilizzante impiegato. La cosa in comune tra i treni di riciclaggio è che la macchina fondamentale, su cui si basa tutto il processo, è la riciclatrice.

Come già accennato, in alcuni treni di riciclaggio è prevista una cisterna, in cui è contenuta l'acqua, che durante il processo di fresatura, viene dosata all' interno della riciclatrice, 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, per fargli raggiungere l'umidità ottimale per il successivo costipamento. Oltre l'acqua, in questa camera di miscelazione possono essere introdotte altre sostanze stabilizzante fluide, come l'impasto di acqua e cemento o come il bitume schiumato che però va iniettato mediante una separata barra spruzzatrice.

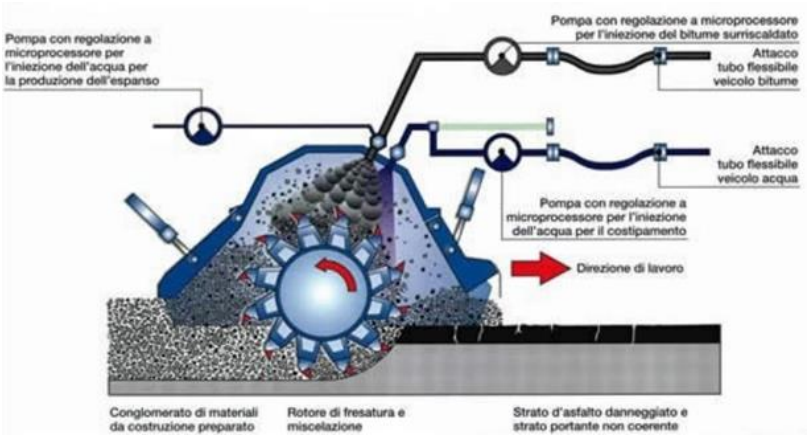

Figura 2.14 - Camera di miscelazione con bitume schiumato

Nel caso di riciclaggio con emulsione, il cemento e l'acqua vengono miscelati insieme in quantità prestabilite, e la miscela così ottenuta viene trasferita mediante un tubo flessibile e iniettato contemporaneamente all' emulsione nella camera di miscelazione della riciclatrice (o pulvimixer).

Oppure, il cemento può essere aggiunto, con un dosaggio di 2-4% rispetto alla massa della miscela. In questo caso viene sparso sopra la superficie stradale prima del passaggio del pulvimixer.

L' emulsione è stoccata in un'autobotte posizionata nel treno di riciclaggio e viene aggiunta in camera di miscelazione.

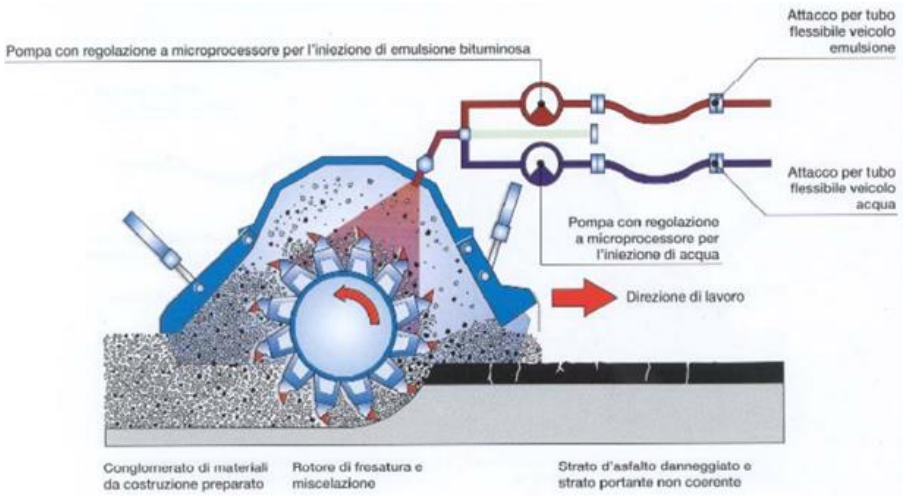

Figura 2.15 - Camera di miscelazione con emulsione bituminosa

Dopo che è avvenuta la stabilizzazione, il materiale viene fatto fuoriuscire dalla parte posteriore della riciclatrice e successivamente sarà soggetto ad un costipamento/compattazione, attraverso una prima passata con il rullo vibrante, e ad una successiva profilatura da parte di una moto livellatrice, e ad una finale costipazione con rullo statico e gommato.

Qualora sia necessario riciclare molto in profondità prendendo anche parte del pietrisco sottostante per aumentare lo spessore del manto bitumato totale, è conveniente preferire il bitume schiumato all'emulsione bituminosa, a causa della necessità di apportare una percentuale maggiore di legante.

2.6.3 Variazione dosaggi dei materiali della miscela

In questa parte si cerca di analizzare come variano le caratteristiche del conglomerato bituminoso se andiamo a variare uno degli elementi che compongono la miscela, basandoci su studi precedentemente fatti e presenti in letteratura:

2.6.3.1 Emulsione bituminosa

Partiamo dallo studio dell'influenza del tipo di emulsione sulle caratteristiche delle miscele riciclate a freddo. Si è infatti visto che i vari prodotti denominati genericamente come "emulsioni da riciclaggio" possono risultare assai diversi tra loro e conducono di conseguenza a proprietà estremamente differenti delle miscele riciclate [14]. Ciò è stato rilevato, mantenendo inalterati i dosaggi e le tipologie degli altri componenti delle miscele, sia nel breve sia nel lungo termine nel caso delle caratteristiche meccaniche (tenso-deformativo e di resistenza). Per quanto riguarda invece le caratteristiche volumetriche (di lavorabilità e di addensamento finale), esse si sono dimostrate relativamente insensibili a variazioni delle caratteristiche delle emulsioni in quanto queste sono state mantenute di tipo non modificato e con una percentuale costante di residuo bituminoso [14]. Nel breve termine, immediatamente dopo il costipamento, i valori del modulo elastico a 20°C e della resistenza a trazione indiretta alla medesima temperatura si sono dimostrati direttamente dipendenti dalla rigidezza del residuo bituminoso dell'emulsione. Per effetto della maturazione della matrice legante delle miscele tali grandezze hanno inoltre evidenziato un aumento nel tempo la cui entità si è dimostrata di difficile previsione e variabile da un prodotto all'altro. Con riferimento alle

proprietà a rottura la maturazione ha infine determinato una variazione delle condizioni di deformazione ultima, che per la maggioranza delle miscele si è tradotta in una riduzione delle deformazioni orizzontali accompagnata da un aumento di quelle verticali.[14] Le considerazioni su esposte sono state confermate impiegando due diverse tecniche di compattazione (di tipo statico e giratorio) che hanno tuttavia fornito, come atteso, risultati differenti tra loro. Sulla base delle osservazioni compiute, gli Autori ritengono che sia opportuno basare la scelta dell'emulsione ottimale da riciclaggio su misure sperimentali analoghe a quelle su descritte. Esse potranno essere integrate da altre prove, già in corso presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, che prevedano l'accelerazione della maturazione delle miscele mediante trattamento termico la valutazione delle caratteristiche di resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti e alla fessurazione a fatica, nonché l'analisi della reologia del legante risultante dal processo di riciclaggio. È infine auspicabile che le attrezzature e prove descritte vengano utilizzate per la definizione di un sistema di mix design delle miscele riciclate a freddo nell'ambito del quale si possa tenere conto del ruolo svolto da ciascun componente. [14]

2.6.3.2 Granulometria RAP e cemento

Per l'ottimizzazione del processo di stabilizzazione a freddo del RAP è necessaria una precedente analisi di laboratorio. Infatti, devono essere studiati la distribuzione dimensionale delle particelle, i leganti e gli additivi.

In particolare, l'interazione tra emulsione bituminosa e particella RAP deve essere studiata su scala microscopica, in modo da poter ottenere maggiori informazioni sulla complessità dei legami tra bitume e particella solida, in presenza di contenuto idrico significativo.

L'analisi dei risultati del modulo dinamico e delle prove di trazione indiretta, che sono state eseguite in laboratorio su campioni cilindrici, porta alle seguenti conclusioni [15]:

- la composizione granulometrica del RAP gioca un ruolo essenziale nell'ottenimento di conglomerati bituminosi a matrice litica solida e assicurando una distribuzione omogenea del legante negli interstizi. Infatti, miscele povere di particelle fini aumentano le aree di contatto tra aggregati e legante.

- Il cemento, all'interno delle miscele bonificate, forma legami che collaborano con il bitume di emulsione, soprattutto quando la quantità di emulsione è bassa. Uno schema semplificato (Figura 5) permette di comprendere le variazioni del modulo dinamico quando il contenuto di emulsione bituminosa aumenta nelle miscele bonificate. Quando il contenuto di emulsione è basso (3,5%), cemento e il bitume sono elementi indipendenti per le particelle leganti, distribuiti in modo pressoché simile (Figura 5-a). Quando aumenta il contenuto di emulsione, è possibile che lo stesso bitume perda parzialmente la sua funzione legante, in quanto copre le particelle di cemento e/o interrompe la continuità delle fibre di cemento (Figura 5-b). Impiegando contenuti più elevati di emulsione bituminosa (5,5%), le aree di contatto aumentano (Figura 5-c) e le miscele di conglomerato bituminoso hanno delle migliori prestazioni, soprattutto in termini di resistenza a trazione indiretta.

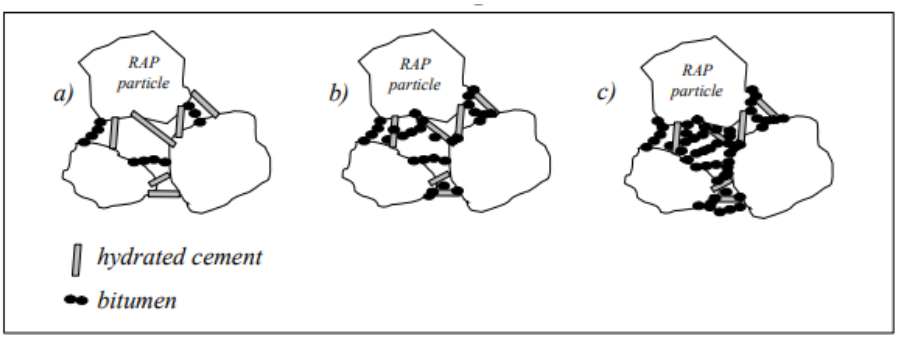

Figura 2.16 – Effetto del cemento e del bitume sulla stabilizzazione del RAP, a diversi dosaggi

La qualità delle emulsioni, ed in particolare la qualità del bitume modificato nell'emulsione, è significativa solo quando il bitume sta effettivamente collaborando all'azione legante (curva granulometrica povera di particelle fini, lungo tempo di indurimento, minore contenuto o assenza di cemento).

Il miglioramento delle proprietà elastiche degli impasti, in particolare l'angolo di fase, dipende dal contenuto di acqua che di solito impedisce un rapido raggiungimento di prestazioni accettabili e indebolisce il contributo del cemento allo sforzo. [15]

Un altro studio fatto da Bocci et All. [17] prevedeva la realizzazione di due miscele con il dosaggio del cemento dall'1% al 2%, e studiando il contenuto d' acqua; per la miscela con l'1%, il valore del contenuto d' acqua suggerisce che l'idratazione completa del cemento fosse raggiunta, mentre per la miscela con il 2% di cemento, la perdita per

evaporazione ha interrotto il processo di idratazione a circa la metà del suo potenziale. Un altro effetto è che l'aumento del modulo di rigidità E_0 dovuto all'indurimento era principalmente correlato alla perdita di umidità.

2.6.3.3 Emulsione bituminosa e filler

A seguito di alcune ricerche riguardo l'impatto delle variazioni di dosaggio dell'emulsione e del filler, sviluppate presso il Dipartimento di Strade dell'Università Politecnica delle Marche, possiamo dedurre le seguenti considerazioni [25]:

- Modulo di rigidezza a trazione indiretta
    - Per la maturazione a tre giorni si può concludere che, variando la percentuale di filler e di emulsione bituminosa, e variando il tipo di emulsione, non si hanno variazioni di modulo di resistenza.
    - Utilizzando l'emulsione MC (non modificata) è possibile notare l'incremento del modulo di rigidezza per la maturazione a sette giorni Tale incremento si accentua per la maturazione a quattordici giorni.
    - Variando la percentuale di emulsione bituminosa da 3,5% a 4%, la maturazione a tre giorni non fornisce variazione, mentre per le maturazioni a sette e quattordici giorni si ha un leggero aumento.
    - Variando l'emulsione da 4% a 4,5%, non si nota nessuna differenza.
    - Aumentando la percentuale di filler da 3% a 3,5% non si notano cambiamenti, mentre si ha un leggero aumento per le maturazioni a sette e quattordici giorni quando il filler passa dal 3% al 4%.

- Resistenza a trazione indiretta:
    - Non si notano significativi cambiamenti al variare del tipo di emulsione, sono state usate un'emulsione modificata (CM) e una non modificata (MC).
    - Mantenendo costante la percentuale di filler e variando la percentuale di emulsione (CM), al netto dei problemi riscontrati per la maturazione a

sette giorni della miscela CM 4% filler 3%, si può notare un aumento della resistenza passando da CM 3,5% A CM 4% per la maturazione a tre giorni, mentre per la maturazione a quattordici giorni non si verificano particolari variazioni.

  - Passando dalla miscela CM 4% a CM 4,5%, non si notano cambiamenti della resistenza in tutte e tre le maturazioni.

  - Variando la percentuale di filler da 3% a 3,5%, i valori della resistenza sono leggermente crescenti ma confrontabili per le maturazioni a tre e quattordici giorni; come detto in precedenza, per la maturazione a sette giorni si sono verificati problemi in laboratorio e quindi nulla si può concludere.

  - Incrementando il filler da 3% a 4% si nota un leggero incremento per le maturazioni a sette e quattordici giorni.

- Coefficiente di trazione indiretta: i dati elaborati risultano dispersi, pertanto non risulta possibile individuare un trend preciso.

- Volume dei vuoti: si fa riferimento solo al volume dei vuoti dei provini sigillati con la paraffina perché nel volume dei vuoti geometrici vengono prese in considerazione anche le imperfezioni presenti sulle superfici laterali del provino. Dallo studio è risultato che variando la percentuale e tipo di emulsione, variando la percentuale di filler, il volume dei vuoti risulta essere compreso tra l'11 e il 12 %.

- Sensibilità all'acqua:

  - In tutti i provini realizzati ed in tutte le maturazioni di tre, sette e quattordici giorni, l'ITSr è risultato maggiore del limite dettato dal Capitolato pari al 90%. La sensibilità all'acqua non risulta quindi un problema.

2.6.3.4 Acqua

Nello studio effettuato da Bocci et All. 2012 [16] sono stati identificati due tipi di curve di compattazione: lineare (a basso contenuto di acqua) e bilineare (ad alto contenuto di acqua). Il punto di flesso della regressione bilineare è situato al numero di rotazioni corrispondenti a un VFL di circa il 90%, indicando che come I VA si riducono, i liquidi tendono a riempirli (la miscela si avvicina alla saturazione); poi parte dell'energia di compattazione viene spesa per aumentare la pressione del liquido interstiziale.

• Il contenuto di acqua aggiunto ha avuto un effetto limitato sulla lavorabilità del SGC e ha influenzato principalmente l'auto compattazione. Inoltre, il contenuto residuo di bitume ha un effetto limitato sia sulla lavorabilità e auto-compattabilità. [16]

È stato anche trovato che l'alto contenuto di acqua, ha mostrato un'evoluzione bilineare di VA o Vm; che ha definito due fasi di compattazione. Nella prima fase, l'acqua ha consentito un'efficace compattazione. Nella seconda fase, quando l'energia assorbita dall'acqua è diventata dominante, si è verificata una diminuzione di lavorabilità dell'impasto e la compattazione ha perso il suo effetto sulla parte solida della miscelazione. Quando la miscela ha raggiunto lo stato di saturazione, il processo di compattazione non ha permesso di ottenere una buona densificazione (alti valori di VA finale). Questo comportamento era meno evidente utilizzando uno stampo scanalato da cui l'acqua potrebbe scolare fuori facilmente durante la compattazione.

Infine, il contenuto di acqua che ha consentito di raggiungere lo stato di saturazione al termine della compattazione processo corrispondeva al contenuto di acqua ottimale che porta al valore minimo di VA. [18]

2.7 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.

2.7.1 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%.

2.7.2 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.

2.7.3 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	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

2.7.4 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° ± 0.02°
- 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.

2.7.4.1 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 rigidezza in configurazione di trazione indiretta (spostamento orizzontale imposto 5±0.2 µm) secondo la Norma UNI EN 12697/26. La miscela ottima di progetto sarà quella che fornisce il modulo di

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

Nel presente capitolo verranno analizzati tutti i materiali utilizzati per il confezionamento delle miscele utilizzate nella sperimentazione, in particolare è stato usato il RAP in tre diversi frazionamenti (grosso, medio e fino), poi filler, cemento Portland, acqua, emulsione bituminosa e fibre.

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.

Se leggiamo le Norme Tecniche d' Appalto Prestazionali, queste in realtà fanno una distinzione tra i termini RAP e fresato. Con il termine RAP si intende il materiale risultante dalla demolizione della pavimentazione con qualsiasi mezzo e seguente frantumazione degli strati bituminosi delle pavimentazioni degradate; con il termine fresato invece si specifica il materiale prodotto dalla demolizione con macchine fresatrici a tamburo, preferibilmente a freddo.

Come già detto nel precedente capitolo, l'utilizzo di questo materiale è sempre più diffuso soprattutto per i grandi vantaggi dal punto di vista ambientale che comporta. Per quanto ne sappiamo ad oggi, ci si può aspettare di poter fare una rigenerazione della pavimentazione non meno di 3 o 4 volte, a condizione che i materiali iniziali siano di buona qualità.

Quindi si intende un bitume in grado di garantire elevate prestazione nel tempo, sia in termini di resistenza ai carichi di traffico sia agli agenti atmosferici, mentre gli inerti non devono produrre troppi fini durante la scarifica della pavimentazione.

Il fresato utilizzato in questa sperimentazione 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 e dallo studio dell'assorbimento attraverso picnometri.

L' analisi granulometrica è stata fatta due volte e poi è stata fatta la media, come riportato nella seguente tabella.

	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 RAP

Figura 3.1 - Campione di RAP utilizzato nella sperimentazione

Come anticipato ad inizio capitolo, durante la sperimentazione il fresato è stato diviso in tre diverse pezzature, questo perché utilizzando la curva di Fuller, si è visto che la ricetta migliore prevedeva la divisione della granulometria nel seguente modo:

- Grande (D= 8- 20mm)
- Medio (D= 1-8mm)

- Fine (D= 0-1 mm)

Figura 3.2 - Campione di RAP fino (D < 1mm) utilizzato nella sperimentazione

Figura 3.1 - Campione di RAP medio (D > 1mm, D< 8mm) utilizzato nella sperimentazione

Figura 3.4 - Campione di RAP grosso (D > 8mm, D< 20mm) utilizzato nella sperimentazione

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 o ceneri volanti. È caratterizzato da dimensioni finissime e la sua funzione è quella di integrare la curva granulometrica e conferire una certa plasticità al conglomerato bituminoso. 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 3.5 - Filler calcareo

Campione:	Filler calcareo
d [mm]	% passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	99,0
1	95,4
0,5	91,4
0,25	86,1
0,125	79,2
0,063	69,5
FONDO	0

Tabella 3.2 - Analisi granulometrica filler calcareo

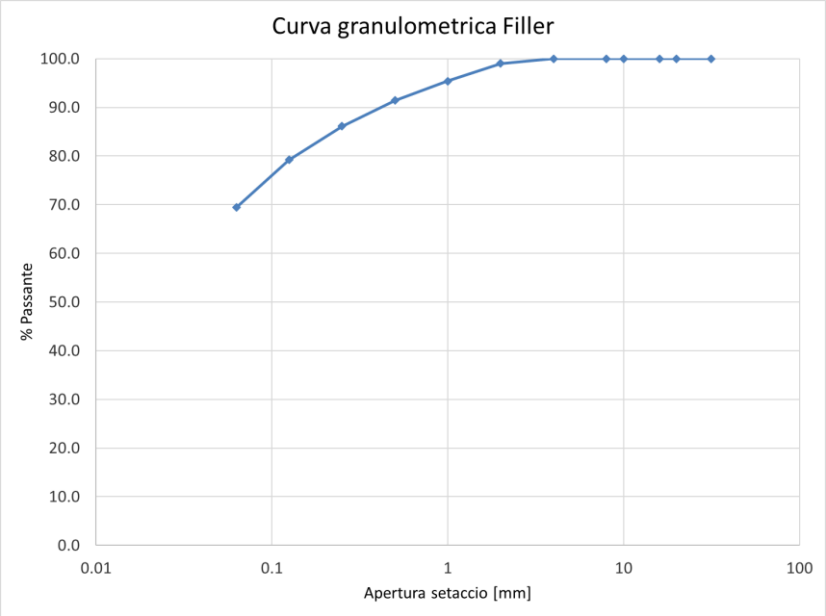

Figura 3.6 - Curva granulometrica filler calcareo

Si utilizza un filler calcareo perché è chimicamente e fisicamente inerte, mentre quello in cemento reagirebbe con gli altri elementi della miscela, e questo 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.

Ovviamente anche il cemento Portland contribuisce al processo di amalgama con l'emulsione.

Nei paesi caldi, la presenza del filler contribuisce ad evitare il refluire del bitume, quindi quello che è un difetto in fase di lavorazione, in fase di messa in opera diventa un vantaggio. [19]

3.3 Emulsione Bituminosa

Nel RAP è presente il bitume utilizzato nella precedente pavimentazione, ma questo ovviamente presenta un invecchiamento chimico e fisico, che comporta un aumento della viscosità e quindi una maggiore fragilità. In laboratorio si è visto come questo comporta una diminuzione dell'indice di penetrazione e un aumento della temperatura palla-anello. [20] Questo bitume già presente non garantisce le giuste prestazione alla miscela finale, quindi solitamente gli si aggiunge l'emulsione bituminosa. L' emulsione bituminosa è composta da due liquidi: l'acqua e il bitume. L' acqua ha una funzione disperdente, mentre il bitume è disperso sotto forma di goccioline. [21]

A temperatura ambiente il bitume presente nel RAP è molto viscoso, quindi la lavorabilità è molto bassa. Per aumentare la lavorabilità ci sono due modi: o si riscalda il bitume oppure si utilizza l'emulsione bituminosa, che riesce a garantire una buona lavorabilità grazie alla presenza dell'acqua.

Infatti, un'emulsione bituminosa è composta dal 60% in volume di bitume e dal 40% in volume di acqua. A volte possono essere presenti anche degli additivi detti "emulsionanti", che impediscono la separazione tra le due fasi, ovvero acqua e bitume.

Una volta avvenuta la miscelazione, avremo il processo chiamato "rottura", in cui l'acqua presente nell' emulsione viene eliminata e quindi le goccioline di bitume rivestono gli aggregati. Durante questa fase aumenta la viscosità dell'emulsione, e quindi diminuisce la lavorabilità della miscela e il successivo costipamento. Per ovviare a questo problema, la rottura deve essere adeguata ai materiali e deve avvenire dopo o durante la fase di compattazione.

La rottura dell'emulsione bituminosa avviene in tre fasi:

- 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:

- Temperatura ambientale

- Temperatura dell'emulsione
- Dimensione delle particelle di bitume disperse
- Dimensione e natura degli inerti
- Modalità di miscelazione e compattazione *[21]*

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 sovra stabilizzata (LL)

Come detto il fenomeno della rottura avviene per perdita d' acqua a causa di evaporazione o assorbimento dovuto alla presenza degli aggregati, ma altri fattori che portano alla coagulazione chimica tra emulsione e aggregato sono i processi di miscelazione e costipamento o la composizione chimica dell'emulsione.

Il fenomeno della coagulazione chimica dipende dall' 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. [9]

Vengono utilizzate più spesso le emulsioni anioniche perché rispondono meglio alle esigenze tecniche, anche se non sono utilizzabili con aggregati acidi quali basalto, porfido e silice, e soprattutto per un grande svantaggio delle emulsioni basiche, che nonostante siamo più economiche e più facili da produrre, hanno il problema che la loro rottura avviene solo chimicamente e quindi sono necessari prodotti chimici catalizzatori che permettono la separazione acqua bitume dopo un intervallo di tempo.

Dopo la rottura avviene progressivamente la presa, ovvero il bitume perde l'acqua rimasta all' interno e aderisce completamente agli inerti. Questa è la fase più critica per l'emulsione, nelle miscele a freddo, perché:

- 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° 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 sovra stabilizzata

Il codice formato da questi termini viene definito designazione.

Nella sperimentazione messa in atto è stata utilizzata un'emulsione MODIFICATA (CM)

Figura 3.7 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

3.3.1 ***Emulsione Modificata con Polimeri SBS – RIGEVAL CM***

Sfruttando RAP, cemento Portland e/o calce idrata, è un tipo di emulsione utilizzata per realizzare conglomerati bituminosi con la tecnica del riciclaggio a freddo. Viene utilizzata principalmente in impianti fissi e realizzata con bitume modificato. Questo bitume viene modificato attraverso l'utilizzo di polimeri elastomerici SBS (stirene-butadiene-stirene), che portano come vantaggio un miglioramento del comportamento elastico e duttile della miscela, con conseguente incremento della deformazione, della sollecitazione e della resistenza a carichi ciclici.

Il processo di modifica avviene per mezzo di mescolatori ad alto gradiente di taglio che consento, mescolandoli, l'omogenea dispersione all' interno della massa del bitume e dei polimeri. A questo la miscela, appena prodotta, di bitume e polimero, chiamata PmB, viene miscelata con la soluzione acquosa per produrre l'emulsione bituminosa. Questa miscela è costituita da un'unica fase dispersa di goccioline di bitume modificato, e quindi viene chiamata monofase

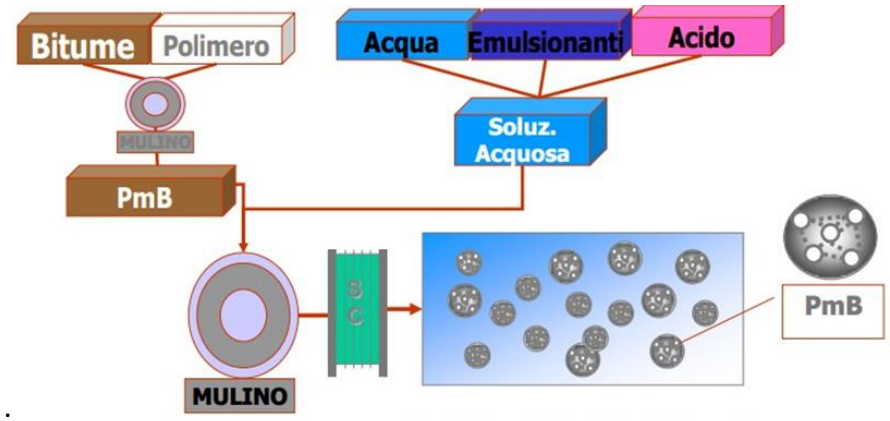

Figura 3.8 - Schema produttivo emulsioni di bitume modificato

Il prodotto va 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. Questo tipo di miscela ha lo svantaggio che si possono creare dei sedimenti, che vanno evitati con periodiche movimentazioni, tuttavia per problemi legati alla presenza di gelo, è sconsigliato l'utilizzo di agitatori a pale.

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.	Prestazione 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/cm²	**2**		6
Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C	UNI EN 13398	%	**75**		4

Figura 3.9 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGEVAL CM

3.4 Cemento Portland

Dopo anni di studi e ricerca nel campo del riciclaggio a freddo, si è giunti alla conclusione che l'impiego dei leganti idraulici, tipo cemento e calce, è favorevole al fianco del legante organico: infatti l'utilizzo di questi due tipi di legante accresce le caratteristiche in esercizio della miscela.

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

Figura 3.10 - Cemento Portland 32,5 R

Il cemento Portland è un prodotto che si ottiene dalla miscelazione del clinker con l'aggiunta di gesso biidrato oppure, in maniera meno diffusa, dell'anidrite naturale. Il clinker è il componente base per la produzione del cemento e dipende dal forno in cui avviene il processo di rottura (klin) in cui avviene il processo di cottura. È costituito da una miscela di argilla, calcare, sabbia, ceneri di pirite ed altri materiali, cotti a circa 1300-1500 °C. spesso viene aggiunto circa il 2% di gesso o di solfato di calcio per migliorare le caratteristiche del prodotto finito. Infine la miscela viene macinata.

3.4.1 Idratazione, presa e indurimento

Il cemento Portland viene miscelato con l'acqua, e a seconda del quantitativo di acqua impiegato, si presenta come una massa di consistenza plastico-fluida dotata di scorrevolezza ed eccellente deformabilità. In questa fase possiamo rimescolare, trasportare e introdurre all' interno di uno stampo, facendogli prendere una determinata forma e compattare la pasta di cemento. Poi avviene il processo di presa, in cui la pasta di cemento solidifica perdendo le caratteristiche di scorrevolezza e la deformabilità.

Poi c'è la fase d' indurimento, dopo 24 ore rispetto alla precedente, nella quale abbiamo la trasformazione dell'impasto in una massa, dell'aspetto tipico dei materiali lapidei, con una notevole resistenza meccanica a compressione.

Le fasi del processo sono il risultato di un insieme di reazioni chimiche tra cemento e acqua.

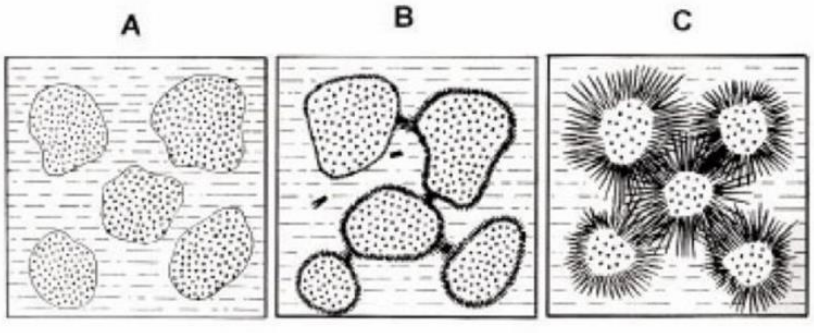

Figura 3.11 - Processo d'idratazione del cemento

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 del rapporto acqua/cemento nell' impasto, e in particolare dipende dalla distanza originaria dei granuli del cemento.

3.4.1.1 Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento

L' idratazione del cemento dipende fortemente dalla temperatura, e quasi tutti i cementi sono fatti per rendere al meglio a temperatura ambiente, quindi in un intervallo compreso tra 10-30°C. Se non ci troviamo in questo range, sia la presa che l'indurimento risultano modificati. [19]

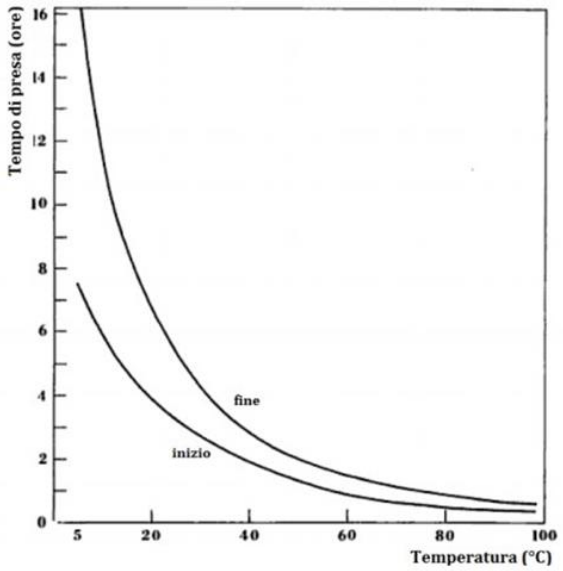

Figura 3.12 - Influenza della temperatura sui tempi iniziali e finali di presa

Dalla 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

Nella miscela in abbinamento con l'emulsione bituminosa, come detto, viene utilizzato il cemento Portland, in particolare quello con classe 325. Come già detto, il cemento è un legante idraulico che una volta entrato a contatto con l'acqua, sia proveniente dall' emulsione, sia quella in aggiunta prevista dalla ricetta, sviluppa le sue caratteristiche, ma può essere anche utilizzato al posto del filler per completate la curva granulometrica.

La quantità di cemento utilizzato dipende dallo strato che stiamo facendo, solitamente la percentuale in cui viene utilizzato è 1-3% sulla massa degli aggregati. Aumentare la percentuale vuol dire passare da un conglomerato bituminoso ad un misto cementato. [22]

Il cemento è un componente molto importante poiché con il suo processo di idratazione e maturazione influenza le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche delle miscele. Sicuramente la caratteristica più importante è quella di aumentare la resistenza, determinata sia dalla dose di stabilizzante che immettiamo, sia dal tipo di materiale trattato. Ma non si può aumentare all' infinito il materiale stabilizzante, perché è vero che aumenta la resistenza ma d'altra parte rende più friabile il materiale. Questo aumento della friabilità comporta un peggioramento del comportamento a fatica, quindi al continuo passare dei carichi dovuti agli automezzi, possono formarsi delle incrinature, che sicuramene è una caratteristica negativa per lo strato di pavimentazione stradale.

Un altro elemento molto importante è la presenza di acqua nell' impasto. Infatti, l'idratazione è necessaria per attivare il cemento. Quindi la presenza in giuste quantità di acqua è fondamentale per il comportamento del cemento, poiché l'idratazione è necessaria per attivare il cemento nella miscela, che senza acqua risulterebbe essere un semplice filler. Inoltre, la presenza di idratazione insieme all' emulsione bituminosa

comporta un vantaggio, infatti l'idratazione sottrae acqua all' impasto e la reazione esotermica produce calore, favorendo la rottura dell'emulsione e la presa finale del cemento. Quindi il cemento ha un'importanza come agente di adesione nelle miscele bituminose a base d' emulsione. [19]

3.5 Acqua

L'acqua è fondamentale nelle miscele in conglomerato bituminoso, e quindi è necessario fare uno studio anche su questo componente delle miscele, perché se utilizziamo acqua comune questa potrebbe avere impurità, sia in soluzione, sia in sospensione. Infatti, la presenza di ioni positivi o negativi può influenzare le proprietà delle emulsioni bituminose. Quindi l'acqua deve essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica o altre sostanze nociva che possa alterale le proprietà della miscela o influire negativamente sui processi necessari per la sua maturazione. [19]

Per creare una miscela con la densità ottimale, bisogna introdurre il giusto quantitativo d' acqua e verificarlo, mediante prove di costipamento. La quantità di acqua solitamente utilizzata per il riciclaggio a freddo è solitamente 5-7% rispetto alla massa del fresato.

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

- dalla frazione acquosa dell'emulsione bituminosa;
- dall'acqua di raffreddamento delle frese nel processo di demolizione;
- dall'acqua eventualmente compresa nella boiacca cementizia;
- 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.

Se abbiamo materiali argillosi o le frazioni di terreno pesante queste possono essere ammorbiditi grazie all' aggiunta di acqua durante la miscelazione, che interessa gli aggregati, e questo fattore è in grado di rompere eventuali agglomerati e uniformare la miscela. Oltretutto, 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. Quindi una elevata presenza di acqua può avere ripercussioni negative sulla miscela.

La lavorabilità e l'addensamento dei conglomerati bituminosi assumono particolare importanza nel riciclaggio a freddo. Queste caratteristiche sono importanti soprattutto in questo tipo di riciclaggio, in quanto uno dei limiti è la difficoltà di impastare i componenti della miscela e di costipare il materiale. La lavorabilità è funzione dell'umidità della miscela: una maggiore umidità implica una migliore lavorabilità.

L' emulsione bituminosa può non essere sufficiente a fornire l'adeguata lavorabilità, ma se aumento l'emulsione avrò come svantaggio un aumento delle difficoltà nel processo di lavorazione, che già è reso più difficile dalla presenza del cemento. La soluzione è quella di aumentare la presenza di acqua, sempre rimanendo nelle percentuali ottimali.

Infatti, non si può aumentare la presenza d'acqua all' infinito, perché valori più alti di quelli ottimali, legati alla caratteristica dei fluidi di essere incomprimibili, porta a limitare l'addensabilità pregiudicando proprietà meccaniche e la durata della miscela.

Come ultimo aspetto, sull' importanza del ruolo dell'acqua, c'è da dire come il corretto dosaggio del quantitativo d' acqua nella miscela, influenzi anche i tempi di sviluppo delle resistenze meccaniche e anche in base al tragitto che gli strati permettono, influenza anche i tempi di evacuazione dell'acqua e quindi i tempi di riapertura al traffico delle strade, aspetto molto pratico dell'impatto di un dosaggio sbagliato d' acqua.

3.6 Fibre

Questa sperimentazione si pone come scopo principale, quello di vedere che impatto hanno le fibre plastiche sul conglomerato bituminoso ottenuto con il riciclaggio a freddo.

Al giorno d'oggi, i materiali per pavimentazioni di migliore qualità sono sempre più richiesti a causa dell'aumento dei volumi di traffico. Pertanto, sono necessarie alcune modifiche per ottenere la qualità necessaria.

Una soluzione è utilizzare le fibre. L'utilizzo delle fibre nelle miscele di asfalto viene utilizzato se ricerchiamo come una delle principali esigenze, di avere uno strato di pavimentazione con elevata resistenza alla trazione e flessibilità. Le fibre sono incorporate all' interno di inerti e cemento bituminoso, sia in processi a secco che a umido, per avere miscele di conglomerato bituminoso con elevata qualità, adesione e flessibilità, migliorandone così le proprietà meccaniche e fisiche. Nelle applicazioni pratiche, le pavimentazioni flessibili sono soggette a diversi danni come solchi, fessurazioni per fatica, termici screpolature e danni o strappi causati dall'umidità. Qualità dei materiali da costruzione, condizioni di drenaggio, penetrazione del gelo, i cicli di gelo-disgelo e i danni legati al carico giocano un ruolo significativo nello sviluppo delle difficoltà della pavimentazione. Perciò, i ricercatori sono invitati a fornire soluzioni per migliorare le condizioni della strada. Fino a poco tempo fa, la manutenzione della pavimentazione era una pratica costosa, quindi dovevano essere ricercate nuove tecniche semplici con costi ridotti. [S4]

Le fibre utilizzate in questa sperimentazione sono della marca FORTA-FI®, che è una miscela di fibre sintetiche ad alta resistenza alla trazione, formulata per rinforzare le miscele di asfalto sia in nuove costruzioni che in progetti di riabilitazione. Il mix di fibre aramidiche e poliolefiniche è progettato per migliorare l'attuale mix design. Le fibre aramidiche non si sciolgono nella miscela di asfalto e sono note per la loro resistenza e durata sia alle alte che alle basse temperature.

FORTA FI è una miscela di 3 fibre sintetiche (poliammidica, aromatica e poliolefiniche) appositamente studiata per il rinforzo strutturale e per aumentare le durabilità in esercizio dei conglomerati bituminosi 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 conglomerato bituminoso, una fibra monofilamento di polipropilene e una fibra poliolefinica con funzioni antiritiro.

L' azione sinergica delle tre fibre nel conglomerato bituminoso 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 il 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 (ormaie); 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.

Le proprietà delle fibre sono:

Fibre	Poliamminica Aromatica	Poliolefiniche
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

Figura 3.13 – Proprietà delle fibre

L' aggiunta di FORTA FI al conglomerato bituminoso 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 ad 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 della fibra risulta trascurabile.

La principale caratteristica del conglomerato bituminoso con 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 del traffico veicolare, le escursioni termiche, l'invecchiamento del bitume con conseguente perdita di elasticità del manto di usura.

Per quanto riguarda 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 e autostradali
- Piste aeroportuali
- Parcheggi commerciali ed industriali
- Marciapiedi
- Piste ciclabili

FORTA-FI può fornire risparmi iniziali sui costi attraverso uno spessore ridotto dello strato di pavimentazione, offrendo allo stesso tempo la stessa durata rispetto alle miscele convenzionali oppure la capacità di ridurre i costi complessivi del ciclo di vita estendendo la vita della pavimentazione (se posizionata a uno spessore di pavimentazione convenzionale).

Le caratteristiche principali sono:

- Progettato per mantenere le sue caratteristiche a tutte le temperature di lavoro
- Possono essere miscelate in impianti batch o a tamburo

- Si distribuisce uniformemente e completamente
- Migliora la resistenza alla trazione, il modulo resiliente, la stabilità Marshall, il flusso, tra le altre proprietà

Sebbene sappiamo da anni che l'aggiunta di fibre di rinforzo all'asfalto ne aumenta notevolmente la durata, è stato molto difficile quantificare gli anni e calcolare quel valore. Ricerche recenti hanno fornito maggiori dettagli sui vantaggi forniti da FORTA-FI. I casi di studio sviluppati dall'Arizona State University utilizzando il software di progettazione della pavimentazione [Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)] descrivono in dettaglio i risparmi sui costi coinvolti nel rinforzo della pavimentazione in asfalto utilizzando FORTA-FI. Questo programma di ricerca determina anche che l'aumento della longevità sarebbe del 50% o più, oltre lo stesso spessore dell'asfalto tradizionale.

Figura 3.14 – Fibre

Vantaggi:

Oggi, più che mai, utilizzare responsabilmente tempo e risorse materiali è l'obiettivo di tutti. FORTA-FI è l'unico in grado di rinforzare tutte le miscele di asfalto consentendo una minore quantità di asfalto o una maggiore durata, il che si traduce in manodopera ridotta, tempi di fuori servizio ridotti, utilizzo di materiale ridotto, riducendo così i costi complessivi del progetto.

Un altro vantaggio è che si mescola accuratamente in pochi secondi.

La facilità d'uso è fondamentale per il successo di qualsiasi prodotto, anche un prodotto in grado di fornire il risparmio sui costi di FORTA-FI. La fornitura di fibre di rinforzo all'industria dell'asfalto sin dagli anni '80 ci ha insegnato che per essere efficace, il prodotto deve essere semplice da aggiungere sia agli impianti batch che agli impianti a tamburo a tutte le velocità di produzione e al dosaggio prescritto.

3.6.1 Prestazioni del conglomerato bituminoso con FORTA FI

La casa produttrice riporta nella scheda tecnica, le differenze di prestazione tra diversi 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

L' obbiettivo 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:

Miscele	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

Figura 3.15 – Componenti dei tre tipi di miscela

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

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

I test riportati in tabella mostrano che il conglomerato bituminoso con aggiunta delle FORTA FI presenta una riduzione dei vuoti paragonabile a quella ottenuta con conglomerato bituminoso 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

Figura 3.16 – Risultati prova per vedere percentuale di vuoti

Stabilità, scorrimento e rigidezza – Prove Marshall secondo 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 conglomerato bituminoso: aumenta all' aumentare si stabilità e rigidezza.

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

Dal confronto di valori della stabilità e della rigidezza, il conglomerato bituminoso con FORTA FI risulta più performante del conglomerato bituminoso con bitume modificato hard e del conglomerato bituminoso 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

Figura 3.172 – Prova Marshall

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

Dall’ analisi si evince che aggiungendo al conglomerato bituminoso con bitume 50/70 le FORTA FI di ottengono incrementi di stabilità e rigidezza paragonabili al conglomerato bituminoso 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

Figura 3.18 – Incremento di stabilità corretta e rigidezza

Resistenza a trazione indiretta

La resistenza a trazione indiretta indica la massima tensione di trazione applicata al conglomerato bituminoso caricato diametralmente fino a 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 conglomerato bituminoso determinando la resistenza a trazione indiretta e il coefficiente di trazione indiretta al tempo iniziale 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 FORTA FI nel conglomerato bituminoso 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

Figura 3.3 – Trazione indiretta

Prova di ormaiamento 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 variabile, 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 confort di marcia. Per determinare se un conglomerato bituminoso è sensibile alla formazione di ormaie si eseguono delle prove secondo il Metodo della traccia delle ruote (Whell 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 seguenti mostrano gli effetti positivi delle FORTA FI nel ridurre la tendenza alla deformazione del conglomerato bituminoso, misurando la profondità e la pendenza delle ormaie:

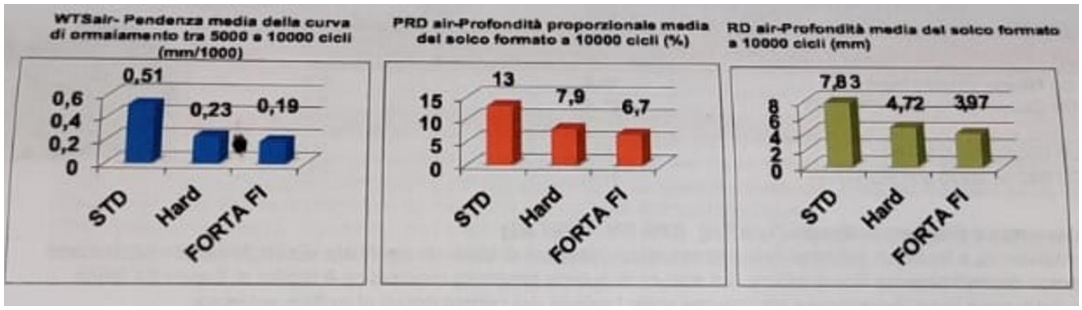

Figura 3.20 - Influenza delle fibre nel ridurre la deformazione

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

- Riduzione della pendenza media della curva di ormaiamento 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

Figura 3.21 – Ormaiamento- Wheel tracking

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

In tabella si riporta una sintesi delle prestazioni del conglomerato bituminosa con bitume standard 50/70 additivato con FORTA FI, in confronto con un conglomerato bituminoso confezionato con bitume Hard. Dall' analisi complessiva dei dati possiamo concludere il conglomerato bituminoso con FORTA FI non solo può sostituire il conglomerato bituminoso 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 Fl** (%)
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 rigidezza al tempo T0	5,2	5,1
Incremento della stabilità corretta al tempo T_{15}	21	27,8
Incremento della rigidezza al tempo T15	9,7	13,4
Incremento della resistenza media alla trazione indiretta a 25°C, Rtm al tempo T0	9,7	24,6
Incremento del coefficiente medio di trazione indiretta a 25°C, CTIm al tempo T0	19	30,2
Incremento della resistenza media alla trazione indiretta a 25°C, Rt_m al tempo T_{15}	5,1	20,3
Incremento del coefficiente medio di trazione indiretta a 25°C, CTIm al tempo T15	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

Figura 3.22 – Riassunto caratteristiche

Capitolo 4 - Metodi di prova 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 sottoparagrafo vengono riportate tutte le metodologie di prova utilizzate durante la sperimentazione.

4.1.1 Analisi granulometrica

L' analisi granulometrica consiste nell' impilare una serie di setacci e procedere ad una vibrovagliatura. I setacci impilati hanno tra loro diverse aperture delle maglie, e possono essere a maglia circolare o quadrata.

Figura 4.1 - Setaccio a maglia quadrata

I setacci impilati sono disposti con apertura crescente dal basso verso l'alto. Il materiale viene posto sulla sommità della colonna di setacci, che viene mossa orizzontalmente, per far scendere il materiale passante nelle varie aperture e bloccare il trattenuto nel rispettivo setaccio. Il diametro dei singoli granuli corrisponde al diametro della maglia circolare che li trattiene, o alla diagonale della maglia quadrata che li trattiene.

La pila è 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

Viene utilizzato il vibrovaglio, poiché l'azione meccanica facilita la vagliatura. Infatti esso fornisce un'oscillazione orizzontale, che viene applicata per 10 minuti, in modo da ottenere una corretta vagliatura.

Passati questi 10 minuti, vengono presi i vari setacci e vengono pesati uno ad uno: 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

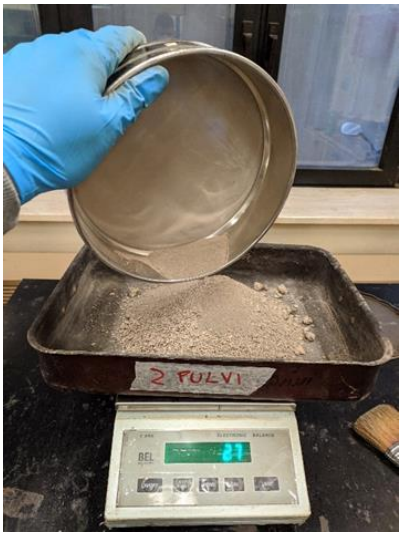

Figura 4.3 - Pesa del contenuto di ogni setaccio

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

Committente				
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	100,1	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:

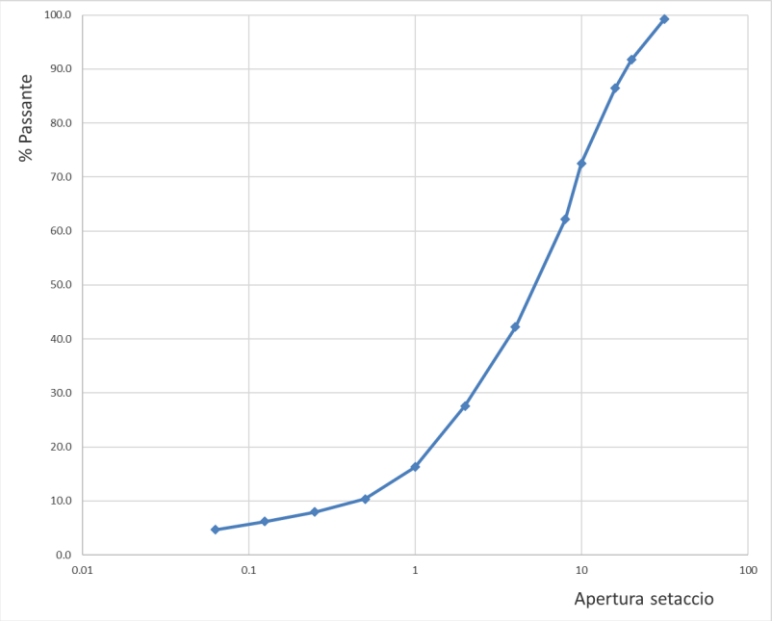

Figura 4.5 - Esempio di curva granulometrica

4.1.2 Massa volumica ed assorbimento degli aggregati

In questa sperimentazione, viene utilizzato il picnometro in vetro per determinare la massa volumica e l'assorbimento d' acqua.

Figura 4.6 - Picnometro

La prova inizia dividendo il campione di materiale RAP in due pezzature, mediante setacciatura:

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

A questo punto si utilizzano due picnometri, uno per l'aggregato fine e uno per il grosso, all' interno dei quali si inseriscono le due pezzature, nel seguente modo:

- 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.

A questo punto, si riempiono i picnometri di acqua fino a sommergere gli aggregati e attraverso l'utilizzo di una pompa per sottovuoto che viene lasciata agire per 20 minuti, si eliminano le bolle d' aria.

Figura 4.7 - Picnometro collegato alla pompa per sottovuoto

Una volta eliminate tutte le bolle d' aria, i picnometri vengono lasciati riposare, insieme a delle bottiglie d' acqua, all' interno di una camera climatica, impostata a 20°C per una notte. L' indomani, i picnometri vengono risottoposti alla pompa per sottovuoto per altri 20 minuti.

Si posiziona il tappo sul picnometro e si riempie quest'ultimo di acqua fino al menisco che si trova sul tappo. Si asciuga esternamente il picnometro e lo si posiziona su una bilancia di precisione misurando la massa *M2*.

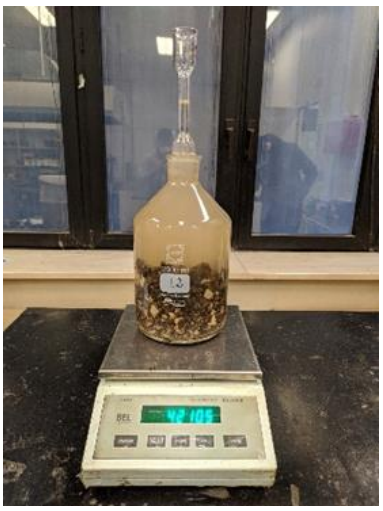

Figura 4.8 - Misura della massa M2

Finita la pesatura, si misura la temperatura dell' acqua T1 con un termometro ad ago, e si verifica che sia $22 \pm 3°C$.

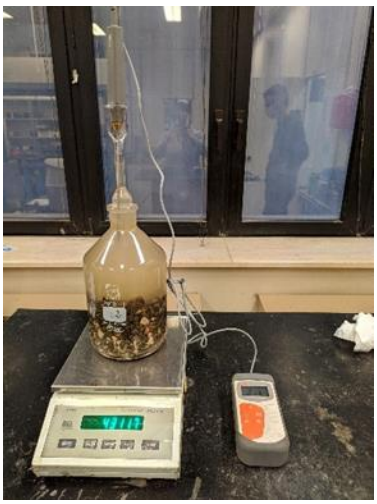

Figura 4.9 - Misura della temperatura T1

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

Per far defluire l'acqua contenuta nel picnometro, si versa tutto in un setaccio con apertura da 2 mm. Il trattenuto viene messo su una teglia con un asciugamano e viene tamponato con altri asciugamani, fino a farlo rimanere umido ma senza un film d' acqua sulla superficie, e quindi nella condizione di superficie satura asciutta (SSA)

Figura 4.10 - Materiale in condizioni di superficie satura

Quindi viene in un primo momento pesata una teglia di alluminio vuota, misurando la grandezza tara1. Su questa teglia viene versato il materiale in condizione SSA, e si

ricava la massa M1, sottraendo il peso appena misurato con il peso della tara1. Ora, si fa riposare per un giorno il materiale in forno a 40°C, e il giorno dopo si ripesa e sottraendo al peso appena misurato la tara1, si ricava la massa dell'aggregato asciutto, M4.

Figura 4.11 - Forno

A questo punto si riempie di acqua il picnometro vuoto fino al menisco presente sul tappo 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

Nel caso di aggregati fini invece la procedura prevede che il contenuto venga versato in un setaccio con apertura da 0,063 mm, sempre con l'obbiettivo di separare acqua e aggregati. Il trattenuto viene posizionato in una teglia precedentemente tarata, quindi con misura della grandezza tara1, e viene messo in forno a 40°C per 30 minuti per togliere l'acqua in eccesso.

Durante questa prova si utilizzano tre attrezzi: un cono cavo, una spatola e un pistone. Questi tre oggetti vengono inizialmente pesati insieme al materiale per avere la tara, poi viene messo tutto in forno e ritirato fuori dopo un determinato intervallo di tempo. Il passaggio successivo prevede di mettere tutto all' interno del cono attraverso l'utilizzo degli attrezzi.

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

Una volta compattato il materiale all' interno del cono, si danno 25 colpi sul materiale con il pistone, cercando di dare colpi regolari e toccando appena il materiale, e poi si toglie il cono. Ora si valuta a quale delle seguenti forme assomiglia il materiale uscito dal cono:

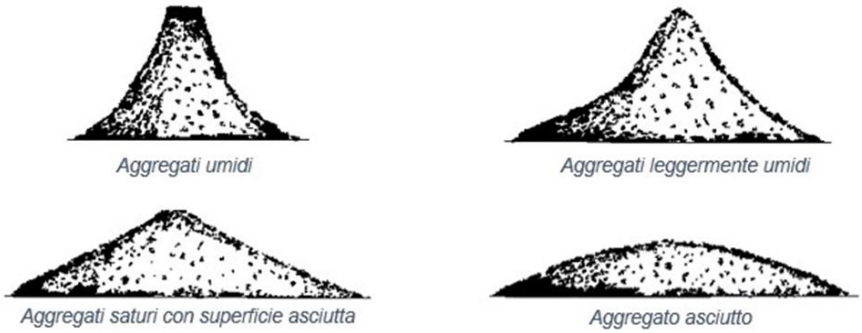

Figura 4.13 - Possibili configurazioni del materiale dopo la rimozione del cono

Una volta che ha una forma simile a quella "aggregati saturi con superficie asciutta", viene ripesata la teglia con tutti gli utensili e sottraendo la tara misurata all'inizio si ottiene M1. Poi la teglia viene messa in forno e dopo un giorno pesata nuovamente ottenendo M4. Come per i grossi, il picnometro viene riempito di acqua fino al menisco e si misura la massa M3 e la temperatura che non deve variare più di 2°C da T1.

Finiti entrambi i procedimenti si possono calcolare 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/m³	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m³
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

Questa fase di preparazione deve avvenire almeno 12 ore prima della seconda fase perché nella seconda fase è necessario avere gli aggregati con solo acqua di assorbimento presente.

In base al mix design scelto, si stabiliscono i dosaggi di peso dei vari materiali, ricavando la cosiddetta ricetta.

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]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	5035	5035
RA2	**medio**	10600	10600
VA1	**grosso**	9275	9275
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	**omya**	1060	1060
Water (abs)		252,1	252,1
Cement	**C1-ref**	519	519
Emulsion		1039	1039
Water di aggiunta		631	631
TOTAL		28411	28411
total for each specimen		2841,1	2841,1

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

Dopo aver preparato gli aggregati, questi vengono messi in forno a 60°C per 1 ora, ripesati, e riaggiunto il materiale per raggiungere il peso misurato prima dell'essicamento.

A questo punto il materiale viene messo tutto all' interno di un cassone di plastica, miscelato manualmente e infine, viene aggiunta l'acqua d' assorbimento (water abs) sempre secondo le quantità stabilite nella ricetta. Il materiale viene poi miscelato manualmente ed il secchio viene sigillato con dei teli di plastica per evitare perdite d' acqua.

Figura 4.16 - Secchio 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. E nel caso si stiano facendo i provini con le fibre, queste si inseriscono ora.

Figura 4.17 - Miscelatore meccanico

Figura 4.18 - Aggregati e fibre versati nel miscelatore

Insieme agli aggregati si versa anche il filler.

Figura 4.19 – Aggregati, filler e fibre nel miscelatore

Si aziona il miscelatore per 1 minuto.

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

Figura 4.20 - Cemento nel miscelatore

3) Si versa la seconda metà del cemento e si ripete la miscelazione per 1 minuto.

4) Si aggiunge metà dell'acqua e si aziona il miscelatore per 1 minuto. A fine miscelazione meccanica si procede con una miscelazione manuale.

Figura 4.21 - Aggiunta dell'acqua

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

Figura 4.22 - Dosaggio dell'emulsione bituminosa

Figura 4.23 - Emulsione bituminosa nel miscelatore

6) Si aggiunge la restante parte di acqua e si mescola prima manualmente e poi si aziona il miscelatore meccanico per 1 minuto. Inoltre, è consigliato pulire le pale del miscelatore da eventuali residui. La miscelazione è così terminata.

Figura 4.24 - Miscela di Riciclaggio a Freddo ultimata

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

I provini vengono confezionati mediante la pressa a taglio giratoria. La pressa ha diverse componenti che sono: 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 presente inoltre, un sistema di acquisizione e controllo dei dati dal quale si può impostare:

- il tipo di prova, cioè se a numero di giri imposto o ad altezza imposta,

- la pressione verticale
- il diametro della fustella.

Il sistema è gestito da un software, che inoltre registra l'altezza del provino ad ogni passaggio e di conseguenza ne regola l'addensamento.

Figura 4.25 - Schermata iniziale del software

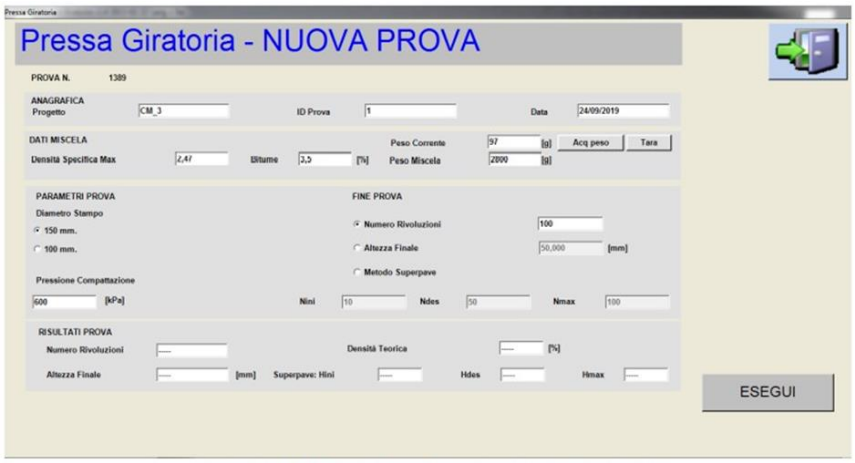

Figura 4.26 - Schermata principale pressa a taglio giratoria

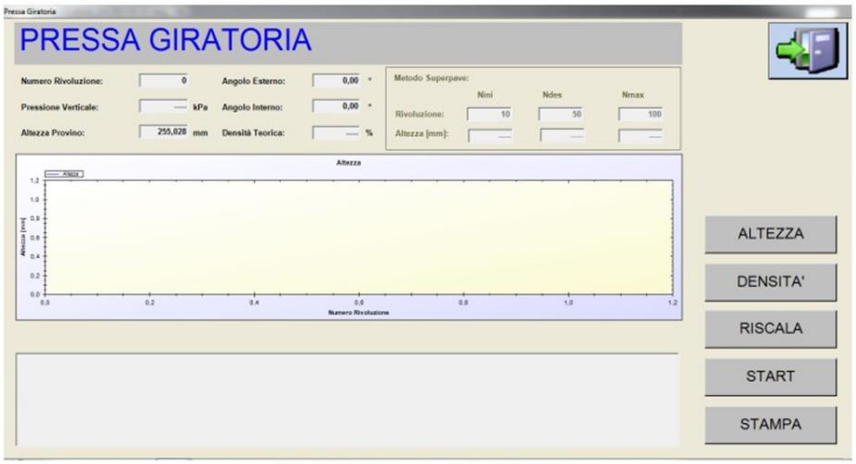

Figura 4.257 - Schermata di avvio prova

Vengono applicate, durante il funzionamento della pressa sia una pressione assiale costante, sia una rotazione. Come detto è presente un supporto inclinabile che permette l'angolo di inclinazione di 1,25°, per favorire l'addensamento.

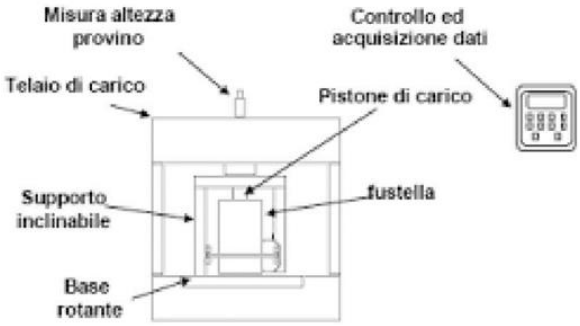

Figura 4.28 - Componenti della pressa a taglio giratoria

La sperimentazione è stata svolta con i seguenti dati:

- Tipo di prova: Numero di giri imposto, 100 o 120 giri (a seconda del tipo di provino).
- Pressione assiale: 600 kPa
- Diametro fustella: 150 mm

Figura 4.29 - Fustella con diametro 150 mm

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

Nella fustella viene inserito il materiale precedentemente preparato, sempre nella quantità indicata dalla ricetta.

Figura 4.30 - Riciclato a freddo inserito nella fustella

Prima di inserire la fustella nella pressa giratoria, si lubrifica adeguatamente tutte le parti della macchina per evitare lo sviluppo di attriti.

Figura 4.31 - Lubrificazione del piano di appoggio

Eseguita questa fase la fustella può essere inserita nella macchina.

Figura 4.32 - Inserimento della fustella nella macchina

Quando si fa partire la prova, la fustella viene inclinata di 1,25° e inizia a ruotare attorno al proprio asse a velocità costante, e il pistone scende e applica la pressione assiale. Vengono completati le rivoluzioni preimpostate e poi si può prelevare la fustella con dentro il provino compattato.

Figura 4.33 - Prova in esecuzione

A questo punto, dopo aver pesato la fustella con dentro il materiale, la fustella viene inserito in dei supporti e un martinetto idraulica solleva la base della fustella e il provino dal basso verso l'alto provocandone la fuoriuscita.

Figura 4.34 - Estrazione del provino

Il software registra l'altezza del provino ad ogni singolo giro, e permette di estrarre 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.

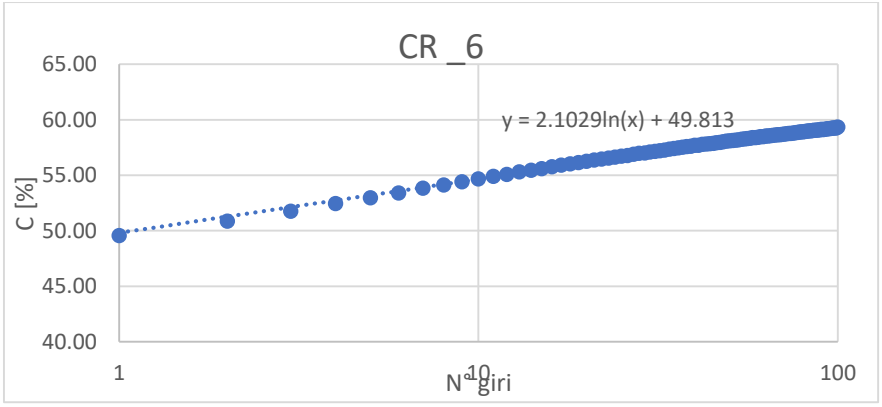

Figura 4.35 - Esempio di curva (n° giri ; C) e relativa interpolazione con equazione della retta

L'intercetta all'asse delle ordinate, indicata come C_1, rappresenta il grado di addensamento iniziale mentre la pendenza, indicata come k, rappresenta la lavorabilità, ovvero quanto viene compattato il materiale. Più è alta k più il materiale di compatta bene.

	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 4.3 - Esempio di riepilogo dei coefficienti C1 e k nei provini di un impasto

Vengono inoltre annotate le seguenti masse:

- Massa della fustella: $tara_1$
- Massa del disco di carta-filtro: $tara_2$
- 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

Il comportamento del conglomerato bituminoso in esercizio è caratterizzato dalla composizione volumetrica delle miscele, che sono costituite principalmente da tre componenti:

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

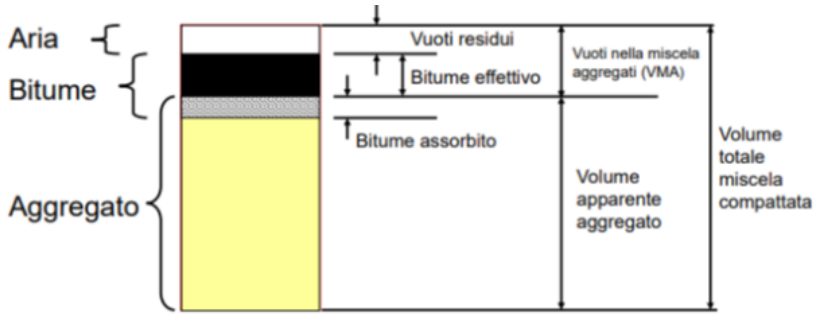

Figura 4.36 - Schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

Ora si elencano i vari metodi per il calcolo volumetrico del provino:

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 temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima ρm del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando un procedimento matematico conformemente 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)

Si definisce massa volumica apparente la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di provino ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica apparente ρb 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 (m1). 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 svolgere la misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester). Questa macchina 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 4.37 - Nottingham Asphalt Tester (NAT)

In particolare, la prova che viene svolta è 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 vanno eseguite su entrambe le direzioni, orizzontale e verticale, lungo i diametri del provino, precedentemente segnati.

Il software dell'apparecchiatura ci permette di controllare tutte le variabili che intervengono: il tempo di picco (rise time)), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso 2 µm) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson (in questo caso fissato a 0,3), la temperatura di prova.

Prima di iniziare la prova, la macchina, attraverso 10 impulsi di condizionamento, effettua una taratura sul campione ed assesta il carico sulla superficie del campione.

Durante questa prova si fa l'ipotesi che il materiale sia omogeneo ed isotropo, e che quindi si possa applicare la teoria dell'elasticità lineare. Questa ipotesi è veritiera poiché, nonostante il conglomerato sia caratterizzato da un comportamento visco-elasto-plastico, alle condizioni di prova si comporta come un materiale elastico lineare, in particolare i moduli di rigidezza a trazione e quello a compressione sono uguali per temperature inferiori a 25°C.

Questa caratteristica di avere i moduli a trazione e compressione fa sì che il modulo del campione sia unico e dipenda da: geometria del campione stesso, deformazione orizzontale, rise time, temperatura di prova e coefficiente di Poisson.

Le sollecitazioni presenti durante la prova sono le seguenti:

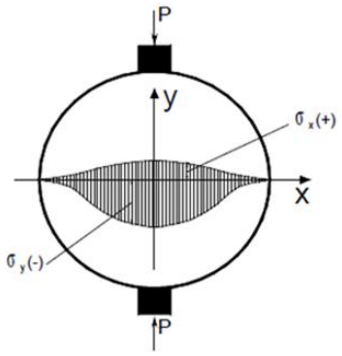

Figura 4.38 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

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

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

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

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 εx 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:

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

Il software tiene anche conto della forma dell'onda di carico impostata, attraverso l'utilizzo di un 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±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.

Per sapere se la prova è stata ben eseguita, dobbiamo sapere che 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±0,2 μm.

Il modulo è maggiormente influenzato dalle seguenti variabili:

- Temperatura: in questa sperimentazione le prove sono state svolte ad una temperatura circa di 20°C. questo per rispettare la condizione per cui il modulo di compressione sia uguale a quello di trazione, che abbiamo sotto i 25°C

- Rise time (tempo di picco): il tempo di applicazione del carico influenza molto la risposta meccanica dei conglomerati, a causa della natura viscoelastica del legante. In prove di carico di tipo impulsivo, come questa, il rise time 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).

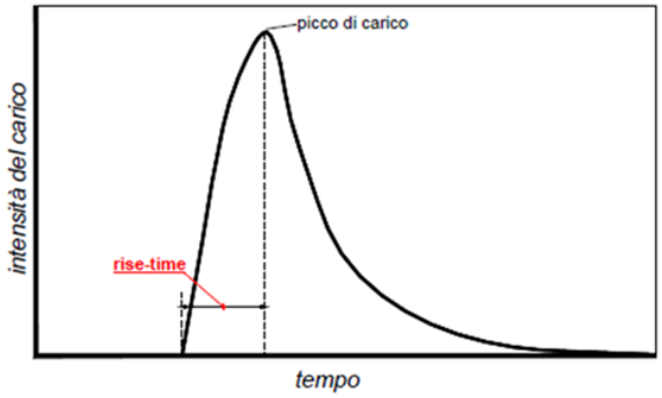

Figura 4.39 - Rappresentazione del rise-time di un impulso di carico

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

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

  In questa sperimentazione è stato utilizzato un rise time di 124 ms.

- Deformazione orizzontale imposta: il livello di deformazione imposta influenza le proprietà meccaniche del conglomerato bituminoso, a causa del suo comportamento non lineare. In questa campagna, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 2 µm;
- Numero di colpi di condizionamento iniziale: come abbiamo già detto, inizialmente vengono dati dei colpi di condizionamento che servono per tarare la prova. Hanno anche lo scopo di assestare le strisce di carico sulla superficie del campione. Perciò diventa molto importante scegliere un adeguato numero di colpi di condizionamento iniziale, per avere valori affidabili di rigidezza. Se utilizziamo un numero più basso di colpi, ovviamente avremo tempi più brevi

ma meno affidabili. Come già accennato, in questa sperimentazione vengono dati 10 colpi iniziali di condizionamento.

Per mantenere la temperatura a 20°, il NAT viene posizionato all' interno di una camera climatica impostata a quella temperatura, che viene misurata da un termometro a sonda collegato ad un display posto nella parte superiore della macchina da cui si può leggere la temperatura.

Il NAT è composto da diverse parti: una cella di carico che sopporta un carico massimo di 20 kN, un pistone collegato a questa cella di carico e permette l'applicazione del carico alla testa di carico a contatto con il provino, la quale, è collegata al computer, che ne riceve e controlla i dati.

Figura 4.26 - Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

La misura viene fatta da dei trasduttori, collegati al computer, che consentono di rilevare con precisione ogni minimo spostamento. Come attrezzatura ci sono altri due strumenti, che formano il castelletto, e che serve per montare i trasduttori in posizione corretta.

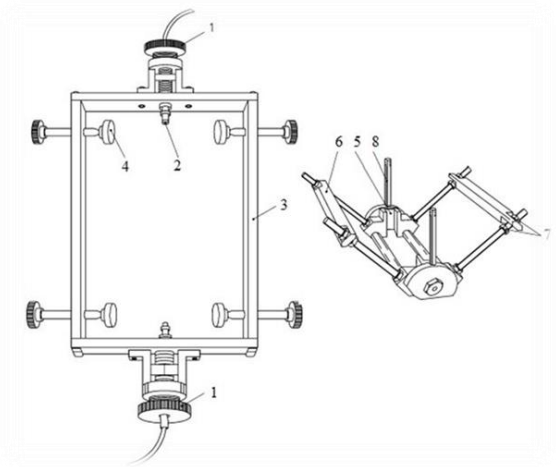

Figura 4.271 - Componenti del castelletto

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, con estrema precisione, i trasduttori.

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.

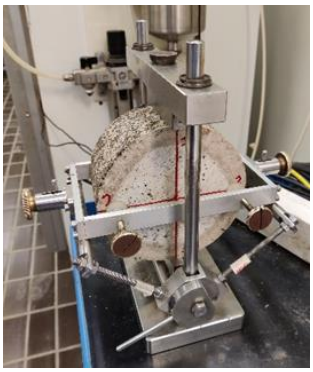

Figura 4.42 - Provino montato sul castelletto e testa di carico applicata

Figura 4.43 - Provino posizionato nella macchina e trasduttori montati

Il diametro e l'altezza media del provino, misurati precedentemente con un calibro, vanno inseriti come input prima della prova. Per l'altezza, si prende la media dei quattro lati del provino.

I provini, seguendo la norma UNI EN 12697-26, devono raggiungere la temperatura di prova desiderata anche all' interno del provino, con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4°C. per fare questo vengono condizionati termicamente in camera climatica.

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

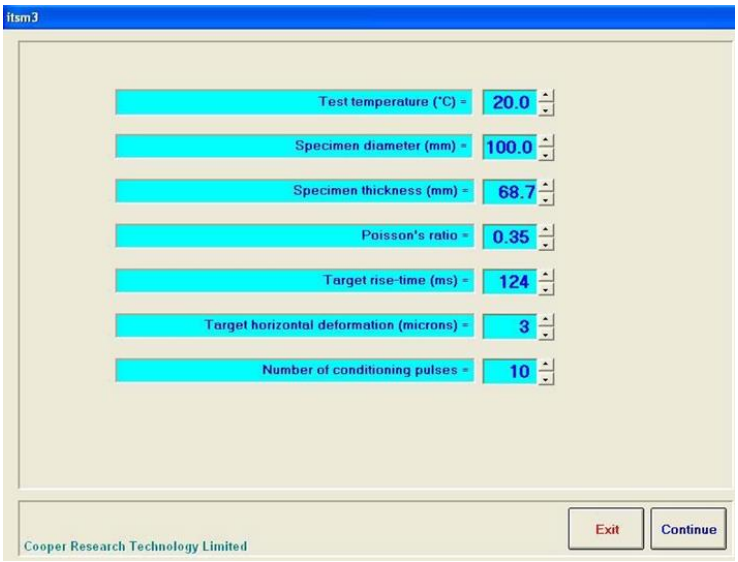

Figura 4.44 - Schermata iniziale del software ITSM con dati input

Come detto la prova inizia inserendo dei dati di input, relativi al provino da testare, all' interno del software della macchina. I dati da inserire sono i seguenti:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- 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;
- Target horizontal Deformation [µm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;
- 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.

Terminata questa prima schermata, se ne presenta un'altra, con solo i dati riguardo la data e altre notizie generali:

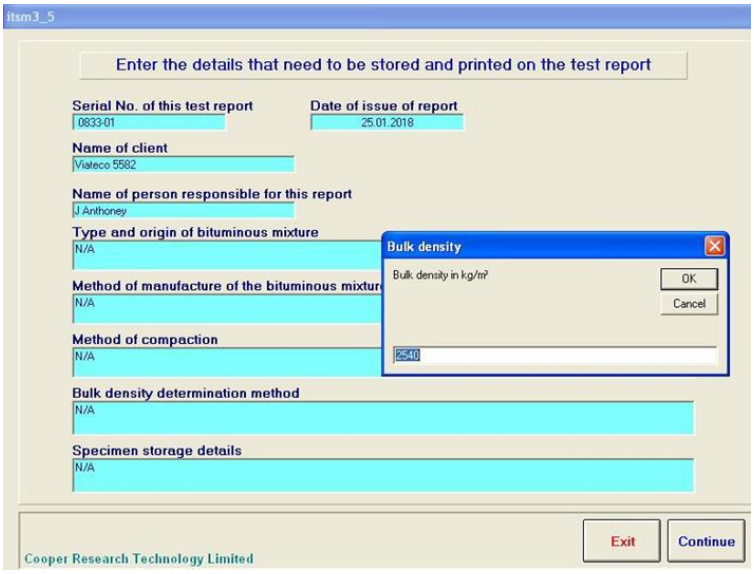

Figura 4.45 - Seconda Schermata

A questo punto, si deve aver già sistemato il provino all' interno del castelletto, e posto quest' ultimo al di sotto del pistone automatico, con cui dovrà entrare in contatto.

Questo viene fatto automaticamente dal software, una volta spinto il pulsante "Make contact", della seguente schermata. A quel punto il pistone si abbasserà, portandosi a contatto con il castelletto, applicando una forza di precarico pari a 30N.

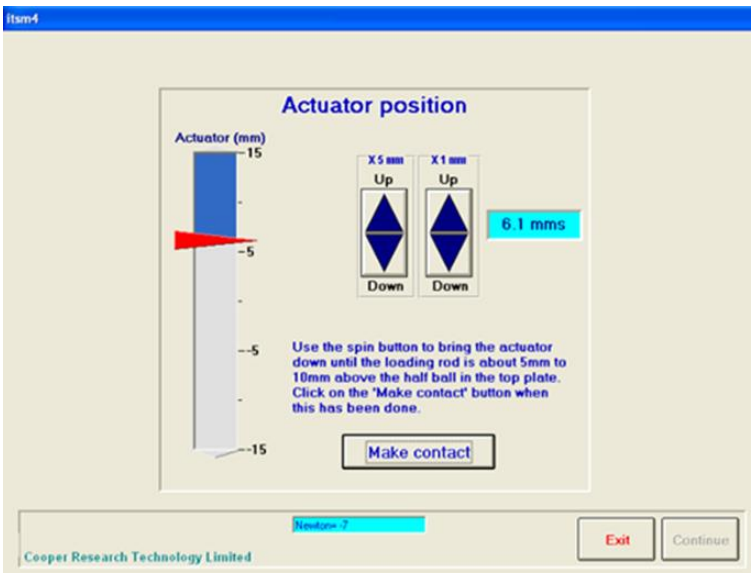

Figura 4.4628 - Schermata con il comando "Make contact"

Una volta che il pistone e il castelletto sono entrati in contatto, appare la schermata di Figura 4.47 che serve per il controllo dei trasduttori. Infatti questi vanno regolati manualmente, inserendoli in appositi supporti del castelletto, fino a che sulla schermata le frecce si colorano di rosso, come in Figura 4.48 questo significa che i trasduttori sono in grado di misurare la giusta deformazione. Se le frecce fossero bianche, la macchina farebbe un autocalibrazione sbagliata, questo comporterebbe l'applicazione di un carico sbagliato, e quindi porterebbe ad avere una deformazione sbagliata e quindi, in definitiva, avremo un test falsato.

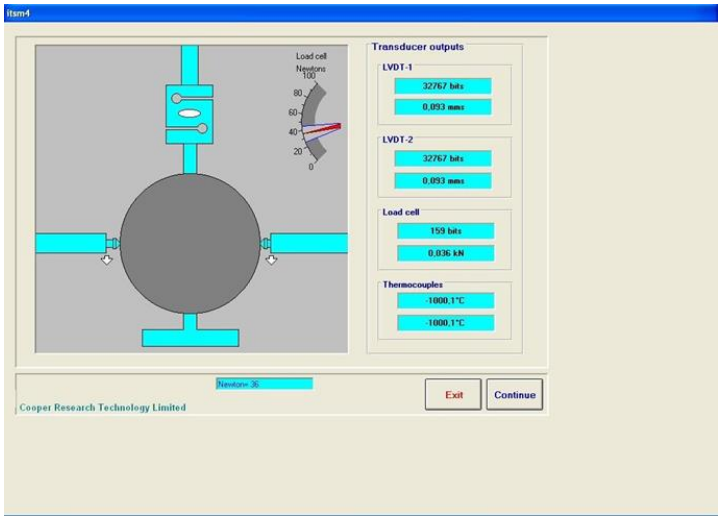

Figura 4.47 - Schermata prima della regolazione dei trasduttori

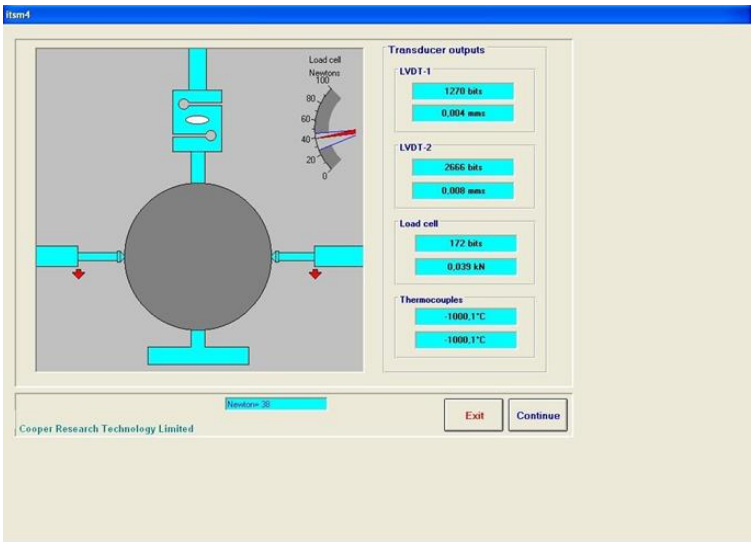

Figura 4.48 - Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

Il passaggio successivo è controllare la temperatura della camera climatica, che deve avere un valore ± 0.5 °C rispetto a quello prestabilito dalla prova, e premere il tasto "Continue". A questo punto avremo la schermata in Figura 4.49 Qui vengono visualizzati i dati che la macchina misura e applica durante i 10 impulsi di pre-carico.

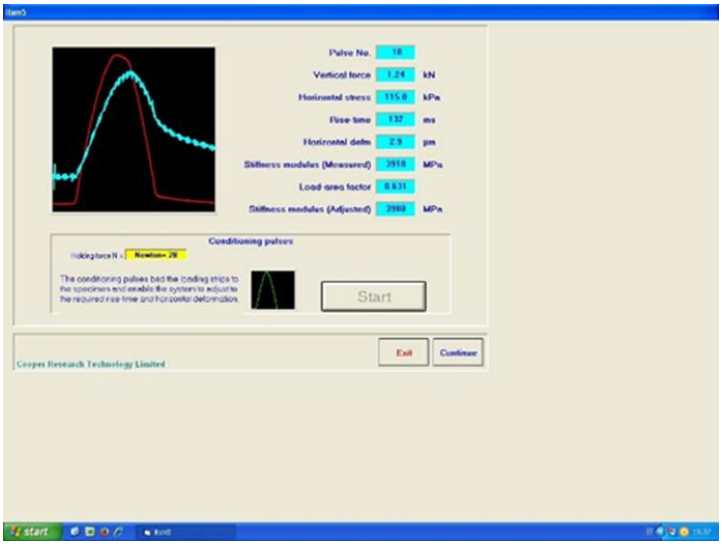

Figura 4.49 - Schermata degli impulsi pre-carico

A questo punto si fa partire la prova e si possono vedere i risultati nella schermata in figura 4.50. 5 impulsi di prova, oltre ad essere rappresentati graficamente, sono descritti dai loro parametri e dai valori medi di questi.

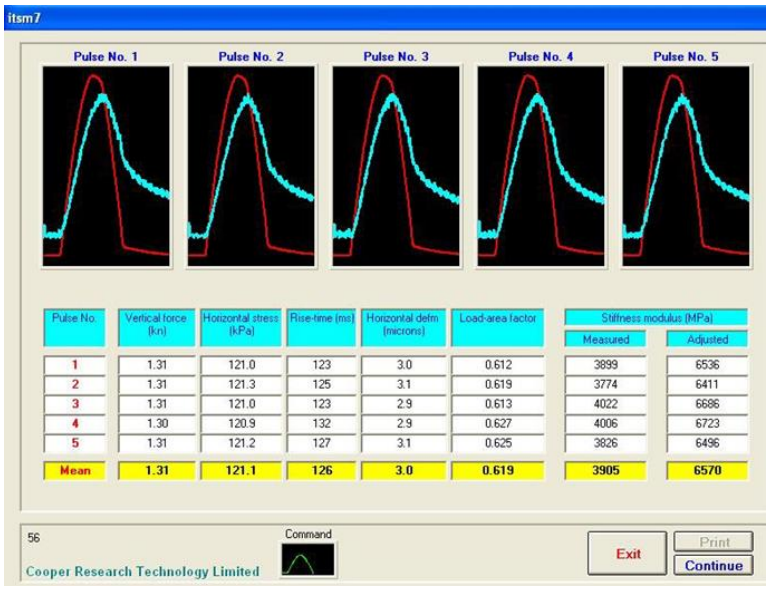

Figura 4.50 - Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Finita la prova, si riapre la camera climatica, si allenta il castelletto e si ruota il provino di 90°C, per poi svolgere la prova sull' altra diagonale. 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, chiamata anche prova Brasiliana, consiste nel comprimere un provino lungo un piano diametrale verticale fino a rottura. La rottura avviene per effetto Poisson, quindi per trazione in direzione perpendicolare a quella del carico.

La prova viene svolta a 25°C, sempre con un precedente condizionamento dei provini di almeno tre ore in camera climatica.

Figura 4.51 - Camera climatica a 25°C

La macchina per questo tipo di prova è composta 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 mediante due manicotti, la testa di carico superiore. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

- larghezza: 15±2 mm;
- spessore: 4±1 mm;
- lunghezza ≥ della lunghezza della linea di contatto del provino.

Bisogna posizionare il provino, ben centrato, tra i piatti della pressa in modo che il suo asse sia orizzontale. L' asse del listello di carico superiore deve essere perfettamente parallelo a quello inferiore e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino.

Figura 4.52 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione. Durante la prova viene misurato sia il carico applicato, sia la deformazione subita, sia verticale che orizzontale, a causa del carico, mediante il sistema di controllo, composto da due comparatori. La testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di 50±2 mm/min.

Alla fine della prova il provino sarà rotto:

Figura 4.53 - Provino rotto dopo la prova

Si può controllare la prova mediante un pannello di controllo oppure in remoto tramite computer. Nel caso di controllo in remoto, vanno impostati i parametri di prova (diametro, altezza, velocità di avanzamento e carico di prova) mentre come output avremo:

- 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.

Il software può calcolare anche il coefficiente di trazione indiretta ITC e la resistenza a trazione indiretta ITS. Nelle figure seguenti si posso vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II:

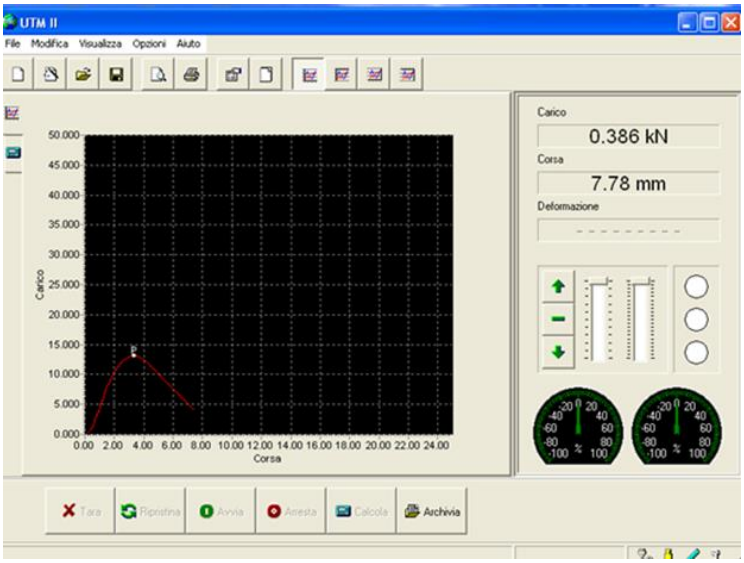

Figura 4.54 - Curva sforzo-deformazione risultante dall'applicazione del carico assiale

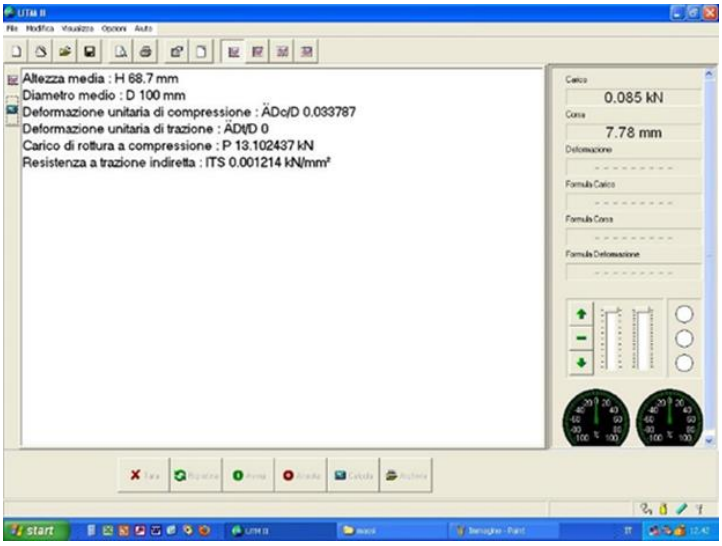

Figura 4.55 - Schermata con rielaborazione dei risultati

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:

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

dove:

- $\mathrm{P_{max}}$ 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 4.56 - Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

4.1.7.1 Sensibilità all'acqua

Con la stessa procedura si valuta la sensibilità all' acqua, per fare ciò bisogna comparare i dati di rottura di un provino "bagnato", con uno "asciutto".

Per poter sviluppare questa prova, i provini devono essere condizionati per 14 giorni nel seguente modo:

- 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

Su questi sei provini si fa la prova di trazione indiretta appena vista.

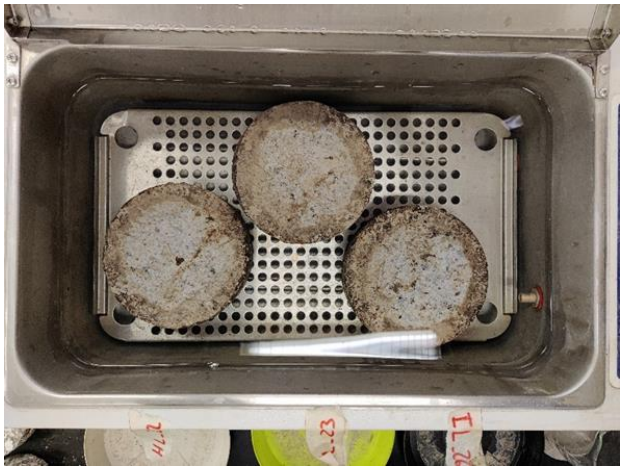

Figura 4.57 - Bagno termostatico

In questo modo calcoliamo ITS wet, ovvero la Resistenza a Trazione Indiretta ITS nel caso bagnato.

Da questo ci si può calcolare il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta del provino condizionato in acqua e quello condizionato in aria, chiamato ITS ratio (ITSr):

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

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:

$$\frac{\pi}{2} * (\frac{Ym}{Xm})$$

Dove:

Ym= è il valore massimo, quindi al picco, sul' asse delle ordinate

Xm= è il valore sull'asse delle ascisse, corrispondente a Ym

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:

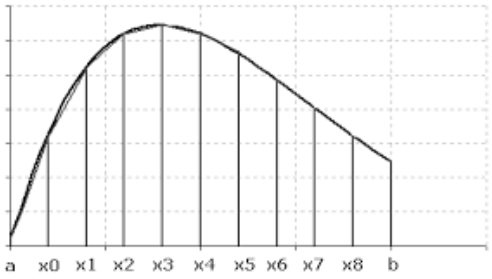

Figura 4.58 – Integrazione per parti

4.1.8 Prova di determinazione Modulo Complesso a Compressione

In questa prova viene applicato un carico di compressione assiale con forzante sinusoidale, infatti si tratta di una prova dinamica in regime oscillatorio. Sottoponendo il provino a diverse frequenze di carico e a diverse temperature, si misura il modulo complesso $|E^*|$ e l'angolo di fase ϕ.

Si utilizza UTM 30, allestita all' interno di una camera climatica, e collegata ad una centralina in cui si posso cambiare le varie impostazioni di prova e si possono acquisire in tempo reale i dati e i risultati della prova, inoltre di può gestire l'alimentatore idraulico. Le impostazioni di prova avvengono tramite il software UTS 006.

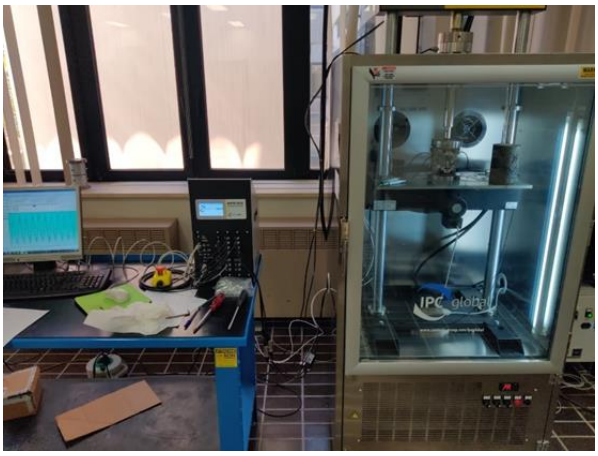

Figura 4.59 - Macchina UTM 30

Inoltre, per la corretta esecuzione della prova, sono necessari i seguenti accessori del macchinario UTM-30:

- 3 trasduttori di spostamento induttivo *LVDT (Linear Variable Displacement Transducer),* presenti in tre colori differenti (nero, verde, blu), che misurano gli

spostamenti assiali che subisce il provino. Vengono applicati a lato del provino grazie all'ausilio di riscontri e Xmen.

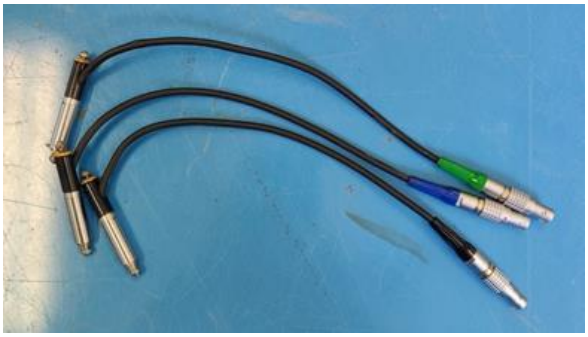

Figura 4.60 - Trasduttori

- 6 riscontri metallici di base esagonale, che permettono l'ancoraggio degli Xmen al provino. I riscontri vengono fissati al provino attraverso una colla bicomponente.

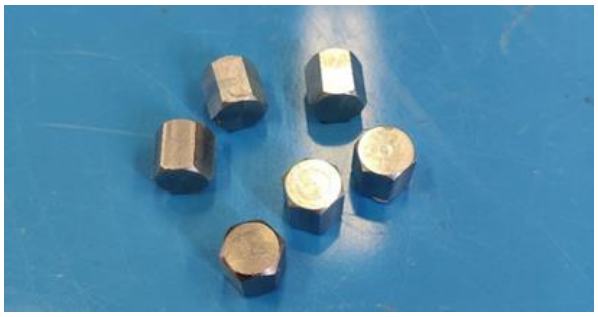

Figura 4.61 - Riscontri

- 6 supporti, detti *Xmen*, da ancorare ai riscontri metallici esagonali mediante un meccanismo a molla, che fungono da supporto per il corretto posizionamento assiale dei trasduttori LVDT.

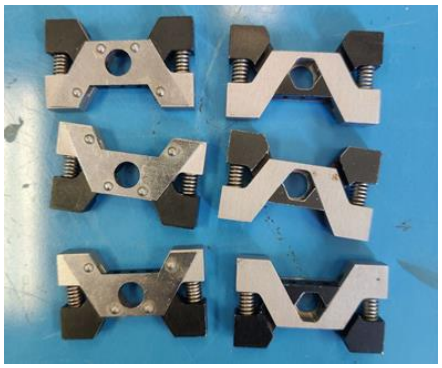

Figura 4.62 - Xmen

- 1 testa di carico metallica di forma cilindrica con un foro circolare al centro di una base per il contatto diretto con la testa sferica del pistone di carico.

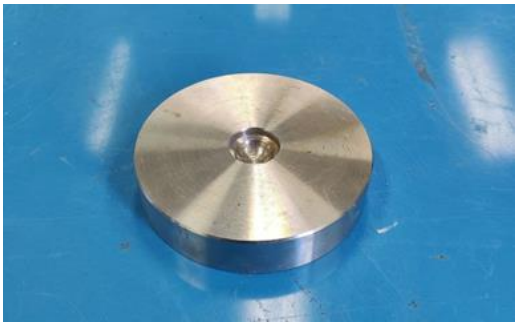

Figura 4.63 - Testa di carico

4.1.8.1 Preparazione dei provini

I provini che vengono utilizzati in questa prova, sono dei provini grandi, da cui viene ricavato solo il nucleo attraverso procedimenti di carotaggio e taglio, perché il nucleo è più rappresentativo delle reali condizioni di compattazione.

Figura 4.64 - Provino carotato e tagliato

Una volta finiti questi procedimenti di carotaggio e taglio, che avvengono sotto un getto d' acqua, il provino riprofilato viene posto in camera climatica per essere asciugato.

Trascorso il tempo necessario, vengono misurate il diametro medio e l'altezza media, prendendo le 4 misurazioni di tutti i lati, del provino.

Il processo di taglio può creare delle imperfezioni sulle superfici delle basi del provino, e questo può creare instabilità del provino durante la prova. Perciò si esegue la spianatura delle basi del provino.

La spianatura del provino, consiste nel ricreare una superficie piana del provino, utilizzando resina epossidica, nel seguente modo:

- Si posiziona una base metallica, avente un lato liscio rivolto verso l'alto, e la si copre con un foglio di carta lucida;

Figura 4.65 - Base metallica con foglio di carta lucida

- Si distribuisce la resina sulla base del provino con l'ausilio di una spatolina cercando di colmare i difetti e le mancanze di materiale;

Figura 4.66 - Applicazione della resina sulla base del provino

- Si pone il provino con la base ricoperta di resina a contatto diretto con un foglio di carta lucida posta sulla base metallica e si applica sul provino una base metallica.
- Si applica una forza sulla base metallica superiore controllando, attraverso una livella, che la base stessa sia in bolla.

Figura 4.67 - Base metallica applicata superiormente e controllo con livella

- Si lascia la base di carico sulla testa e si procede con una spatolina a rimuovere la resina fuoriuscita dal bordo della base a causa della compressione indotta.

Figura 4.68 - Rimozione della resina in eccesso

- Si lascia solidificare la resina per il tempo necessario senza toccare il provino per almeno 1 ora

- A solidificazione avvenuta si solleva il provino e si rimuove la carta lucida ottenendo così una superficie perfettamente liscia.
- Si ripete la procedura appena illustrata per la seconda faccia e per tutti i provini di progetto.

Spianate entrambe le facce, si rimisurano, sempre attraverso il calibro, le altezze del provino che saranno leggermente variate.

L' ultima fase prevede l'incollaggio dei riscontri. I riscontri sono il supporto su cui inserire gli Xmen, in cui vengono inseriti i trasduttori.

Si incollano 6 riscontri a coppia, quindi, 2 riscontri per ogni trasduttore, collocati a 135° tra di loro nel piano. Per fare ciò vengono posizionati su dei braccetti di una specifica apparecchiatura per il corretto distanziamento e posizionamento. L'accortezza da eseguire è di collocare i riscontri in egual distanza da entrambe le basi e di posizionarli in adiacenza di una superficie del provino regolare e priva di fori.

I riscontri vengono fissati grazie alla forza di questi braccetti e grazie ad una colla epossidica bicomponente applicata alla base di ogni riscontro.

Figura 4.69 - Apparecchiatura di laboratorio per applicazione dei riscontri

4.1.8.2 Parametri di prova

I parametri di prova sono:

- Temperature: il provino viene sottoposto a una serie di quattro prove dinamiche a quattro temperature diverse, rispettivamente 5 °C, 20 °C, 35 °C, 50 °C. La prova viene eseguita solamente dopo un condizionamento del provino, alla temperatura di prova, di 3 ore.
- Frequenze di carico: è stato indagato il comportamento del provino per 8 diverse frequenze di carico, rispettivamente 20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 Hz.
- Prova eseguita a deformazione assiale imposta, in particolare è assunto 25 micro-strain ($25 \cdot 10^{-6}$ mm/mm) per temperature comprese tra 5°C e 20 °C, e 35 micro strain per temperature comprese tra 35 °C e 50°C.

Il pistone di carico controlla e fornisce la sollecitazione assiale, mentre la media delle misurazioni delle estensioni dei 3 trasduttori LVDT posti lungo l'asse del provino ad una posizione di circa 135° in pianta tra di loro ci fornisce la deformazione assiale.

Di seguito viene illustrato il funzionamento del software *UTS 006 - AMPT Dynamic Modulus Test*.

Figura 4.70 - Software UTS 006

Inizialmente, nella fase di preparazione alla prova si deve scegliere il Template.

In questa sperimentazione si è impiegato il Template rigidezza intermedia.

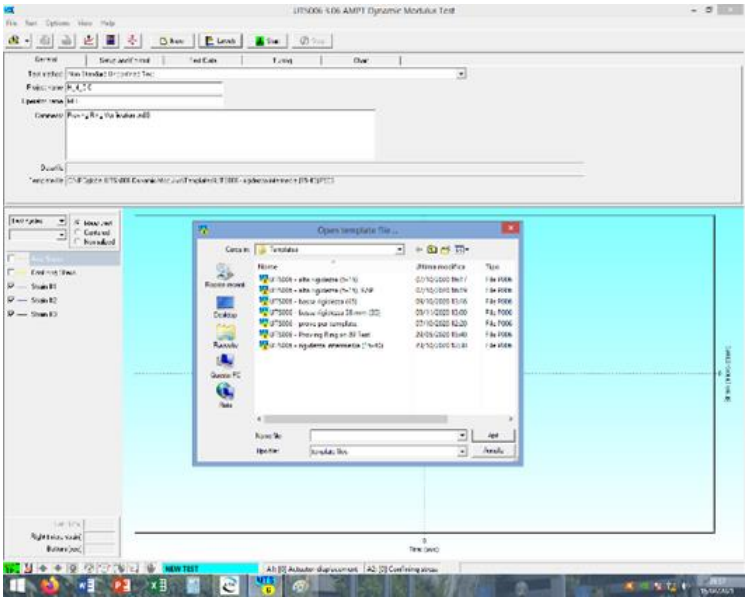

Figura 4.71 - Scelta del template

A questo punto si inizializza un nuovo file e nella sezione “Setup and Control” e si immettono i parametri di prova:

- Nome provino
- Altezza
- Diametro
- Stima del modulo complesso iniziale
- Frequenze di carico
- Micro-strain, in particolare:
    - Micro strain $20 \div 30$ per temperature di 5°C e 20°C
    - Micro strain $30 \div 40$ per temperature di 35°C e 50°C

L’ alimentatore idraulico, accensione e spegnimento dei motori, i movimenti verticali del pistone e della traversa si gestiscono mediante il pulsante “Virtual Pendant”.

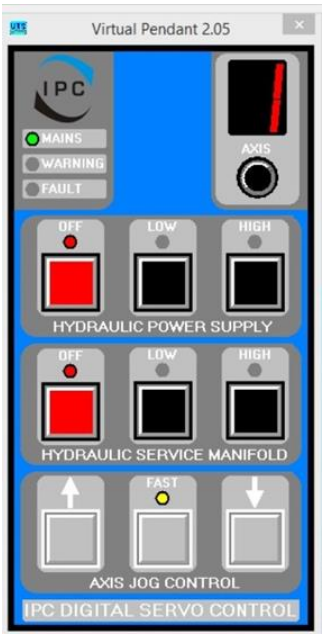

Figura 4.7229 - Virtual Pendant

Il provino viene inserito sulla base rialzata presente sulla traversa, gli Xmen vanno ben ancorati ai riscontri. Si posizione la base cilindrica con l'incavo circolare in corrispondenza del pistone sulla testa del provino, questa serve a ripartire il carico assiale indotto dal pistone al provino. I tre trasduttori LVDT (nero, verde, blu) sono collocati all' interno degli Xmen prima predisposti.

Ogni trasduttore possiede su una sua punta un meccanismo manuale formata da una ghiera e una vite per regolarne la corsa. Si verifica che le barre che indicano la corsa dei traduttori risultino a metà attraverso la finestra "Transducer Levels Display", a questo punto per rimuovere imprecisioni a livello di software si impone il comando "set zero offset".

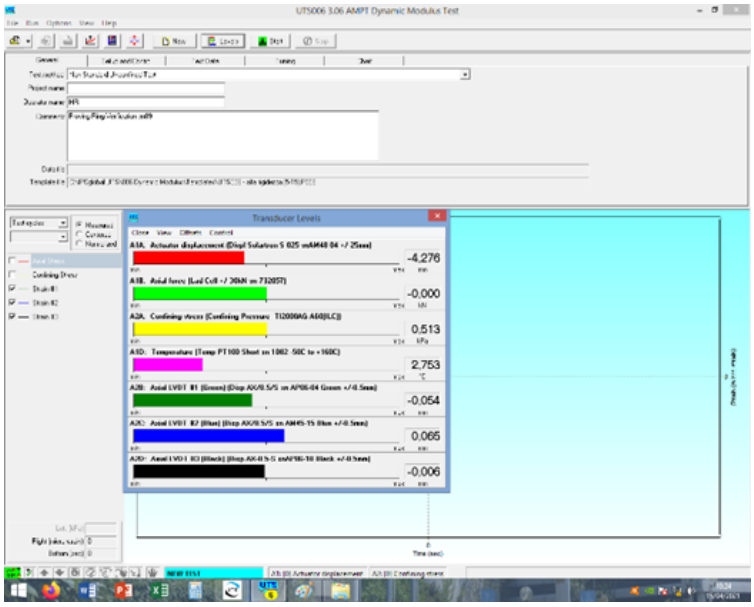

Figura 4.73 - Transducer Levels

Sempre tra le procedure preparatorie c'è la fase in cui si verifica il corretto posizionamento del provino. Per evitare danneggiamenti al provino, questa fase si svolge a 20°C, con una deformazione imposta di 30 micro-strain e una frequenza di carico di 1 Hz.

Si può muovere il pistone e si fa partire questa fase pre-prova. Una volta finita si valuta la forma delle onde di deformazioni, che devono essere più o meno simili tra i tre trasduttori. Se ciò non succede si sposta il provino manualmente e si rifà la procedura.

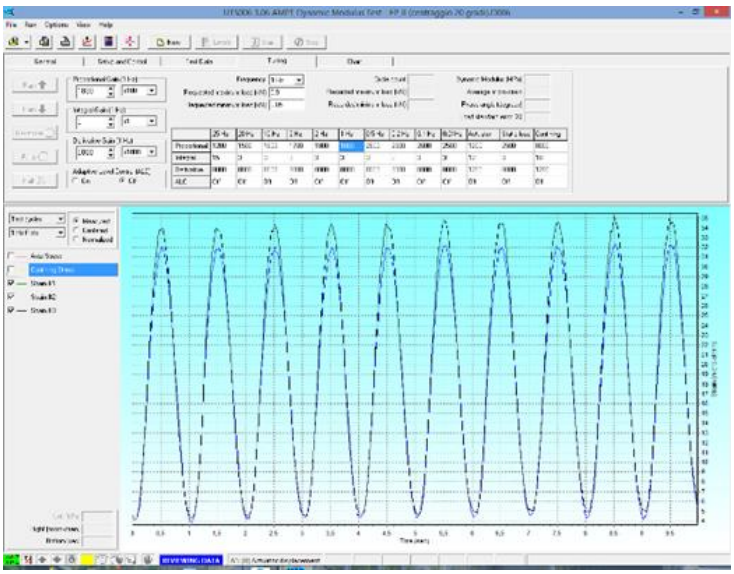

Figura 4.30 - Tuning

Una volta che il provino e i trasduttori sono ben posizionati, può iniziare la prova vera e propria, con il provino che rimane a condizionare alla temperatura di prova. Si inseriscono i parametri di prova e si inizia la prova.

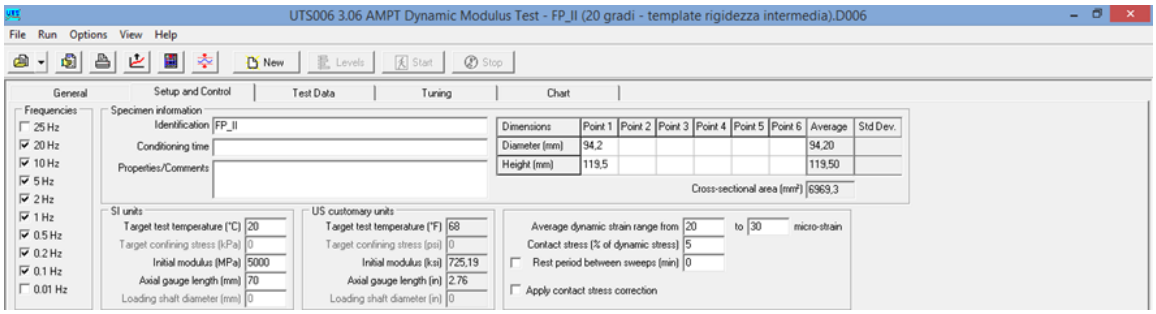

Figura 4.74 - Finestra Setup and Control

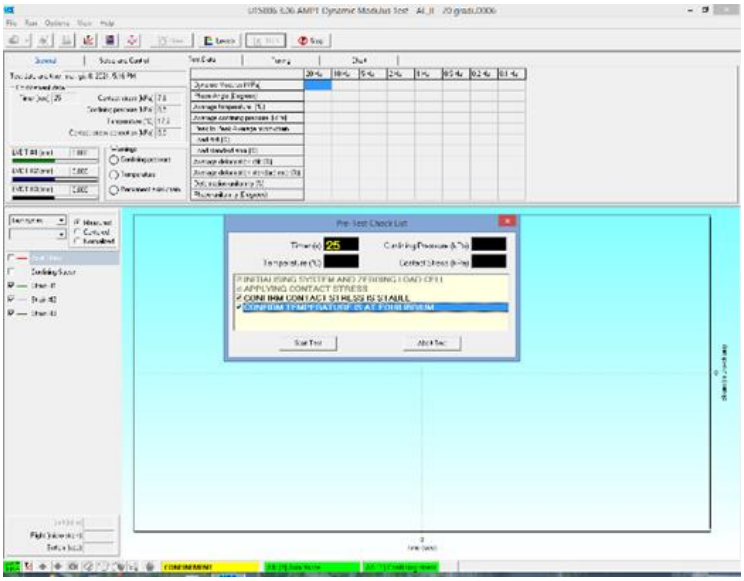

Figura 4.75 - Pre Test Checklist

Nella sezione *Test Data* si osservano in tempo reale i valori dei risultati della prova e l'andamento delle curve dei 3 trasduttori.

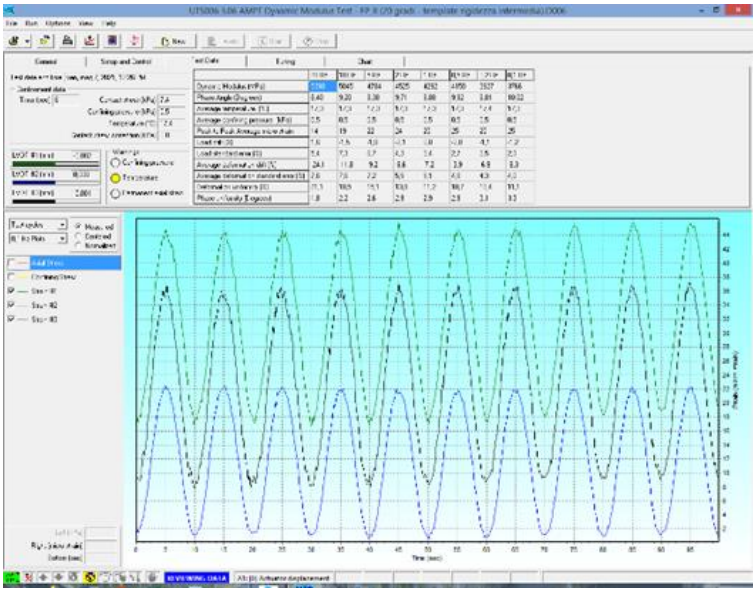

Figura 4.76 - Test Data

Alla temperatura fissata, si fanno variare le frequenze di sabato, e si osservano i valori del modulo dinamico e dell'angolo di fase. Devono essere soddisfatte affinché l'esecuzione della prova sia corretta, le seguenti condizioni:

- $Deformation\ uniformity\ (E) \leq 20\%$
- $Phase\ uniformity\ (\delta) \leq 5°$
- $Average\ deformation\ drift < 0$

Una volta svolta la prova a tutte le frequenze per una singola temperatura, si passa alla temperatura successiva e si ripete la prova.

I risultati della prova vengono riassunti cosi:

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	6867	6568	6338	6055	5825	5674	5480	5359
Phase angle [°]	6.4	7.5	8.01	8.17	8.3	8.35	8.32	8.42
20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	5398	5045	4784	4525	4292	4150	3927	3766
Phase angle [°]	8.4	9.2	9.38	9.71	9.88	9.92	9.81	10.02
35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	4025	3704	3449	3133	2899	2705	2462	2291
Phase angle [°]	10.2	10.88	11.44	12.09	12.52	12.96	13.35	13.53
50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	3222	2778	2510	2263	2058	1913	1726	1610
Phase angle [°]	13.57	12.8	13.08	13.03	13.86	14.06	13.93	13.94

Figura 4.77 - Esempio di risultati ottenuti attraverso una prova dinamica di modulo a compressione

Per ogni temperatura si fa una curva isoterma, e poi queste vengono traslati in un'unica, detta curva maestra, tramite i fattori di traslazione e interpolati con l'ausilio di un modello analitico. Si ottengono cosi il modulo dinamico, il modulo complesso, la componente elastica e viscosa del modulo complesso e l'angolo di fase, che servono a descrivere il comportamento viscoelastico lineare nel conglomerato bituminoso.

4.1.9 Determinazione della curva maestra

Per rappresentare graficamente il comportamento visco-elastico lineare del conglomerato bituminoso o del legante bituminoso mediante una curva ottenuta dall' applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura. La curva presenta una temperatura prefissata chiamata temperatura di riferimento Trif, l l'andamento di una grandezza dinamica, modulo dinamico $|E^*|$ o angolo di fase φ, in funzione della frequenza di carico ridotta f_r.

4.1.9.1 Principio di sovrapposizione tempo temperatura

Il conglomerato bituminoso dipende dalla temperatura e dal tempo, essendo un materiale a comportamento viscoelastico. Questo ci permette di sfruttare il principio di sovrapposizione tempo-temperatura, il quale afferma che gli effetti ottenuti dall'applicazione di un carico ad una determinata frequenza e ad una determinata temperatura sono identici a quelli ottenibili applicando, sullo stesso materiale, un carico con una frequenza diversa ad una temperatura diversa. Quindi gli effetti prodotti da

temperatura e dal tempo di applicazione del carico sono sovrapponibili, in particolare una riduzione della frequenza di carico produce gli stessi effetti di un aumento di temperatura. I materiali che rispettano tale principio di TTSP (*time-temperature superposition principle)*, sono definiti termoreologicamente semplici. [23]

Il TTSP ammette che una variazione di temperatura modifica i tempi di rilassamento di un identico fattore di traslazione noto anche con il termine *shift factor*, quindi, tutti i tempi di rilassamento sono ugualmente dipendenti dalla temperatura. Perciò, se si considera un sistema avente i seguenti tempi di rilassamento τ in funzione della temperatura di riferimento $T_{rif} = T_0$:

$$\tau_1(T_0), \tau_2(T_0), \tau_3(T_0), \ldots,$$

se si cambiano le condizioni di temperatura da T_0 a T, allora si modificano anche tutti i tempi di rilassamento del sistema:

$$\tau_1(a_T), \tau_2(a_T), \tau_3(a_T), \ldots,$$

dove, a_T è il valore del fattore di traslazione orizzontale (*horizontal shift factor*) e risulta essere funzione esclusivamente della temperatura T.

Quindi, la traslazione dei dati sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche in regime oscillatorio con forzante sinusoidale avviene con i soli fattori di traslazione orizzontale (*horizontal shift factors*) ricavabili analiticamente attraverso numerose leggi presenti in letteratura.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, ci si avvale dell'*equazione empirica di Williams-Landel-Ferry* (o *equazione di WLF*) relativa al principio di TTS e permette di determinare il fattore di traslazione orizzontale (*horizontal shift factor*) a_T mediante la seguente relazione:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1\left(T - T_{rif}\right)}{C_2 + \left(T - T_{rif}\right)},$$

dove:

- C_1 e C_2 sono due costanti da regolare in funzione al valore dello *shift factor* e dipendono dalla temperatura e dal materiale;

- T_{rif} è la temperatura di riferimento.

Nel lavoro sperimentale eseguito, gli *horizontal shift factors* a_T sono relativi alle quattro temperature di prova T (5 °C, 20 °C, 35°C e 50 °C): a_5, a_{20}, a_{35} e a_{50}.

4.1.9.2 Modello generale 2S2P1D

Nella fase analitica del lavoro sperimentale affrontato, per regolarizzare e interpolare i risultati sperimentali misurati in ogni singola prova dinamica di modulo complesso eseguita, ci si avvale del *modello generale 2S2P1D [24]*

Gli elementi meccanici principali che costituiscono questo modello, gli danno anche il nome:

- *2S* corrisponde a 2 springs, cioè 2 molle (E_∞-E_0 e E_0);
- *2P* corrisponde a 2 parabolic elements, cioè 2 elementi parabolici (k e h);
- *1D* corrisponde a 1 dashpot, cioè 1 smorzatore viscoso lineare (β)

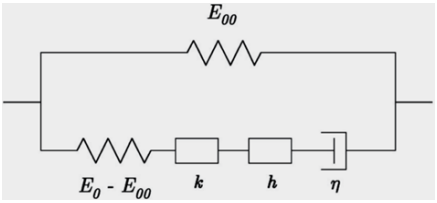

Figura 4.78 - Rappresentazione grafica modello 2S2P1D

Questo modello, ad una prefissata temperatura e introducendo 7 parametri (E_0, E_∞, δ, k, h, β, τ), permette di determinare il modulo complesso E^* mediante la seguente relazione:

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

dove,

i è l'unità immaginaria del numero complesso, $i^2 = -1$;

ω è la frequenza angolare, $\omega = 2\pi f$, f è la frequenza di carico;

E_0 è il modulo statico relativo a $\omega \to 0$;

E_∞ è il modulo vetroso relativo a $\omega \to \infty$;

δ è un parametro adimensionale di forma;

k, *h* sono i parametri degli elementi parabolici, $0 < k < h < 1$;

β è un parametro adimensionale della viscosità Newtoniana η del dashpot;

τ è il valore del tempo caratteristico che varia solo in funzione della temperatura.

Secondo il TTSP si nota che solo il parametro τ dipende dalla temperatura *T* e si definisce:

$$\tau(T) = a_T(T)\,\tau\left(T_{rif}\right) = a_T(T)\,\tau_0\,,$$

dove,

a_T è il fattore di traslazione orizzontale alla temperatura *T* ricavato con l'*equazione empirica di WLF* [23];

τ_0 è il tempo caratteristico alla temperatura di riferimento $T_{rif} = T_0 = 20$ °C.

Quindi determinando sperimentalmente i parametri possiamo rappresentare il comportamento viscoelastico lineare del materiale con un modello meccani fisico attraverso l'utilizzo del modello 2S2P1D.

4.1.9.3 Rappresentazione grafica

Considerando il TTSP e considerando il modello 2S2P1D, si possono riportare i risultati sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche in regime oscillatorio, graficamente, identificando cosi il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso, abbiamo diverse possibili rappresentazioni grafiche:

- *Curva Maestra* o *Master Curve*

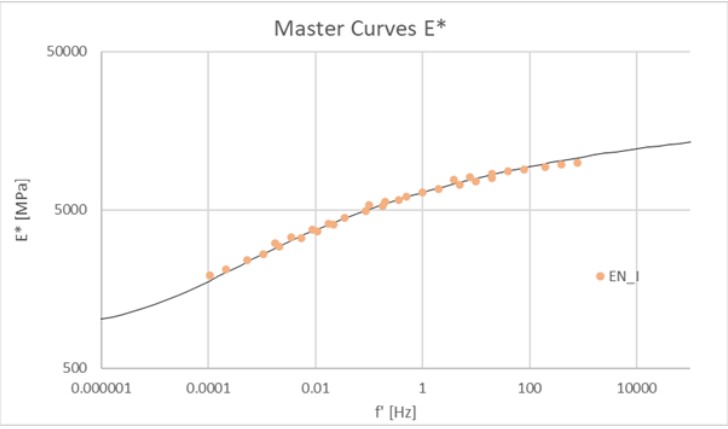

Figura 4.79 - Esempio di curva maestra

- *Piano di Black*: in questo piano si riporta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ al variare dell'angolo di fase φ.

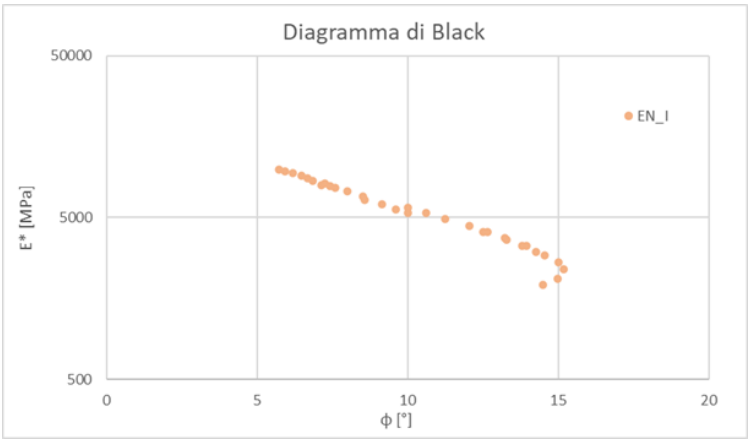

Figura 4.80 - Esempio di diagramma di Black

- *Piano di Cole-Cole*: è una rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso. Il piano è descritto dalle componenti del modulo complesso E^*. L'asse delle ascisse riporta la componente elastica E_1 (modulo di restituzione elastica) che identifica il lavoro reversibile, mentre l'asse delle ordinate rappresenta la componente viscosa E_2 (modulo di dissipazione viscosa) a cui è associato il lavoro irreversibile.

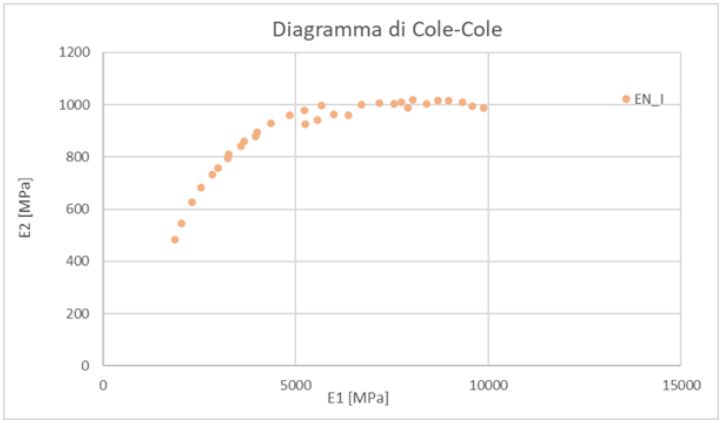

Figura 4.81 - Esempio di diagramma di Cole-Cole

4.1.10 Prova a fatica (UNI EN 12697-24)

Anche questa prova viene svolta grazie al "Nottingham Asphalt Tester" (NAT), e anche in questo caso il provino deve essere condizionato per 4 ore a 20°C.

Come ogni prova a fatica, il provino è sottoposto a carico inferiore a quello critico ma per un numero di cicli talmente elevato, che il carico applicato lo porta a rottura. Fatto

un determinato numero di prove, si costruisce un grafico in scala bilogaritmica, che ha sulle ascisse il numero di cicli e sulle ordinate la deformazione iniziale ε_0, e si mette al suo interno il risultato della prova, sottoforma di punto.

Lo scopo finale è ottenere una retta, che può essere descritta almeno attraverso tre prove, che però abbiano livelli deformativi diversi (basso, medio, alto), per poi interpolarli e ricavare la legge di fatica.

Prima di tutto bisogna scegliere la tensione orizzontale, che può essere stimata dal modulo di rigidezza della prova ITSM. Maggiore è il modulo, maggiore è il valore di tensione orizzontale applicabile Il software ITFT, dopo 115 cicli di carico, restituisce il valore della deformazione iniziale ε_0, utile a definire il punto per costruire la curva di fatica.

La norma poi indica di effettuare una replica per ogni misurazione effettuata ad un certo livello deformativo.

Un esempio di retta che ricaviamo è la seguente:

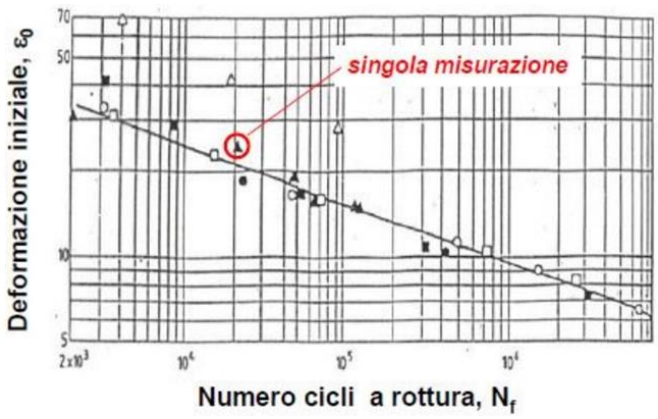

Figura 4.82 - Legge di fatica del materiale

Nonostante si utilizzi il NAT anche per questa prova, vengono utilizzati un castelletto diverso e la disposizione dei trasduttori è diversa.

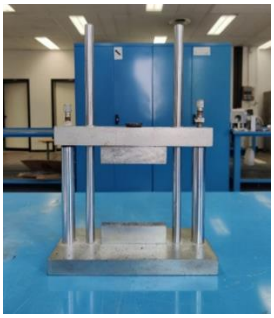

Figura 4.83 - Castelletto per prova di fatica

Figura 4.85 - Castelletto per prova di fatica

Prima di metterlo nel castelletto, il provino deve essere dotato di due lamierini che servono per l'installazione dei trasduttori. Questi lamierini vengono fissati con una colla, e viene fatta asciugare in camera climatica, e poi viene posto il provino nel castelletto e questo nel NAT. I trasduttori in questa prova vengono posti in posizione ortogonale rispetto al pistone.

Figura 4.85 - Castelletto e testa di carico contenenti il provino a cui sono attaccate barrette e trasduttori

Posizionato il castelletto, si procede attraverso il software ITFT allo svolgimento della prova.

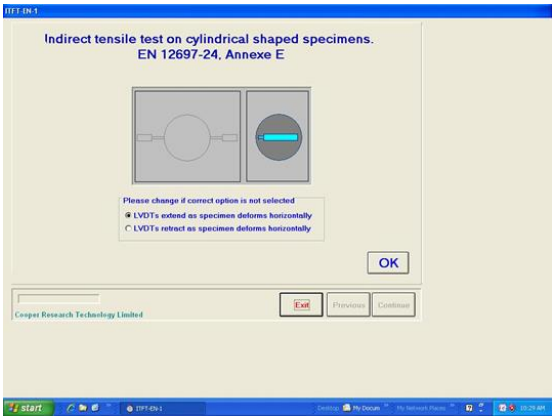

Figura 4.86 - Schermata iniziale software ITFT

Nella seconda schermata si inserisce il nome del provino:

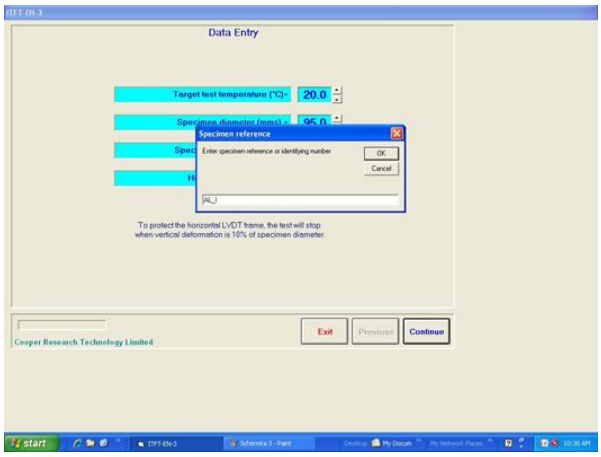

Figura 4.87 - Inserimento nome provino

Mentre nella terza schermata si inseriscono:

- Temperatura di prova;
- Diametro del provino
- Altezza del provino
- Tensione orizzontale imposta

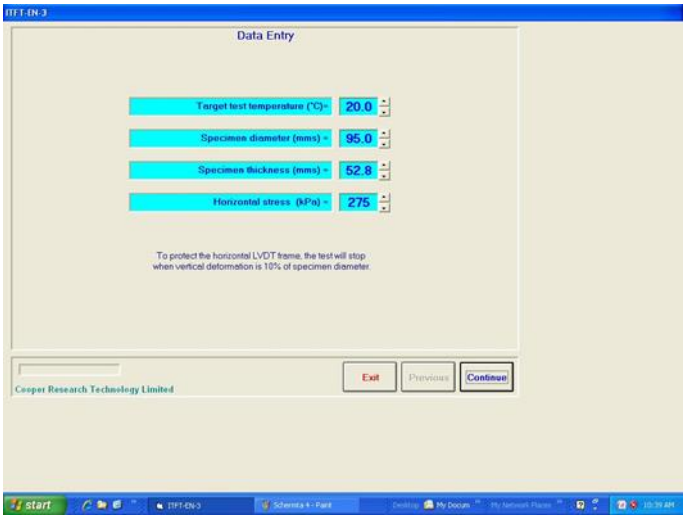

Figura 4.88 - Inserimento dati provino

Si inserisce la tensione orizzontale iniziale σ_0

Anche qui, come nella prova di modulo, vanno posizionati i trasduttori, che qui vengono regolati con due viti presenti nel lamierino. E anche in questo caso la giusta posizione ci verrà indicata dal colore rosso che prenderanno le lancette.

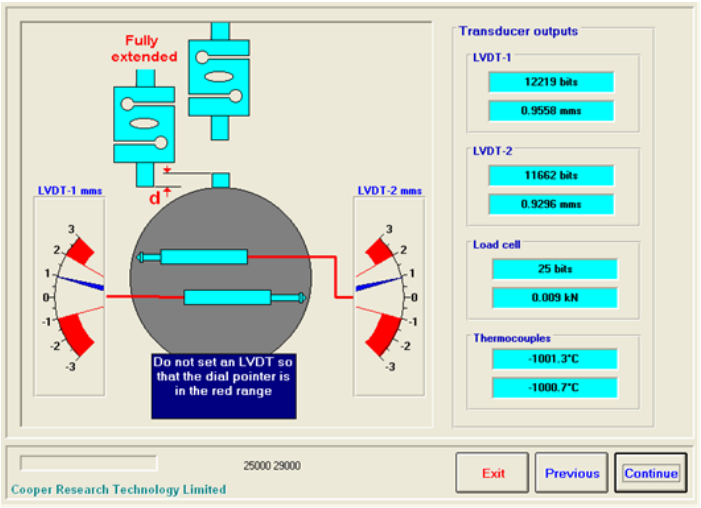

Figura 4.89 - Posizionamento corretto dei trasduttori

A questo punto si fa partire la prova, il pistone andrà in contatto con la traversa del castelletto e applicherà il carico.

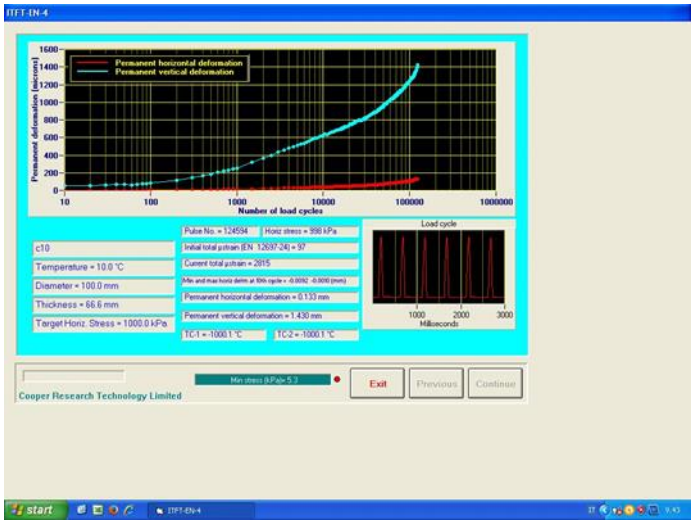

Figura 4.90 - Prova di fatica in esecuzione

La prova finisce quando il provino raggiunge la rottura.

4.2 Programma Sperimentale

Lo scopo dell'analisi condotta riguarda lo studio delle caratteristiche meccaniche di due miscele diverse: una prima miscela con materiali classici e una seconda miscela, uguale alla prima ma con l'aggiunta 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 2 diverse miscele di riciclaggio a freddo, con le fibre che rappresentano l'unica variante.

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 Brecce Bianche.

In questa prima fase sono state fatte due tipologie di prove preliminari:

- Analisi granulometrica
- Picnometro per la valutazione della massa volumica

4.2.1.1 Classificazione del materiale

In questa prima fase sono stati prelevati due campioni, che chiameremo Perugia 1 e Perugia 2, e su di questi è stata effettuata l'analisi granulometria. Di seguito sono riportati i risultati:

Committente				
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	100,1	0

Figura 4.91 - Analisi granulometrica campione Perugia1

Committente				
Campione	Perugia_2			
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 4.92 - Analisi granulometrica campione Perugia2

Sono state disegnate le curve granulometriche:

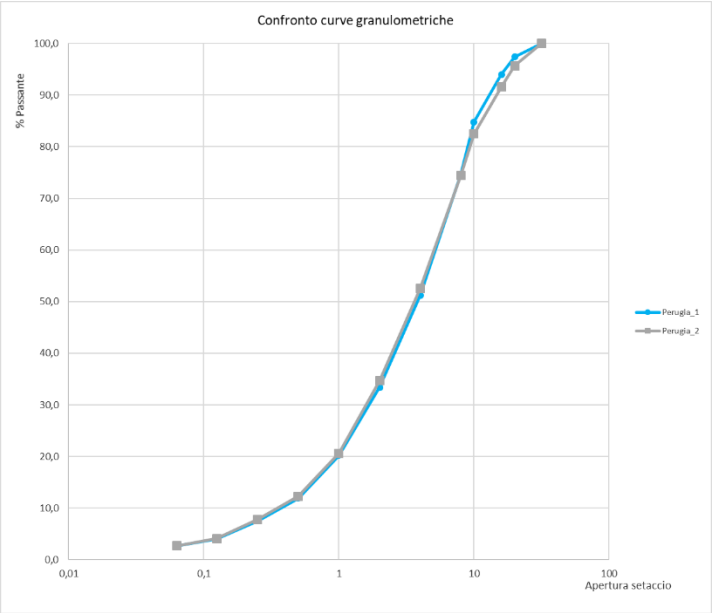

Figura 4.93 - Curve granulometriche campioni Perugia1 e Perugia2

Come si può vedere da questo confronto tra le curve granulometriche, si può notale che i due campioni sono granulometricamente simili. Per questo motivo è possibile considerare questi due materiali come simili e quindi 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 4.94 - Riepilogo analisi granulometriche e calcolo della curva granulometrica media

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

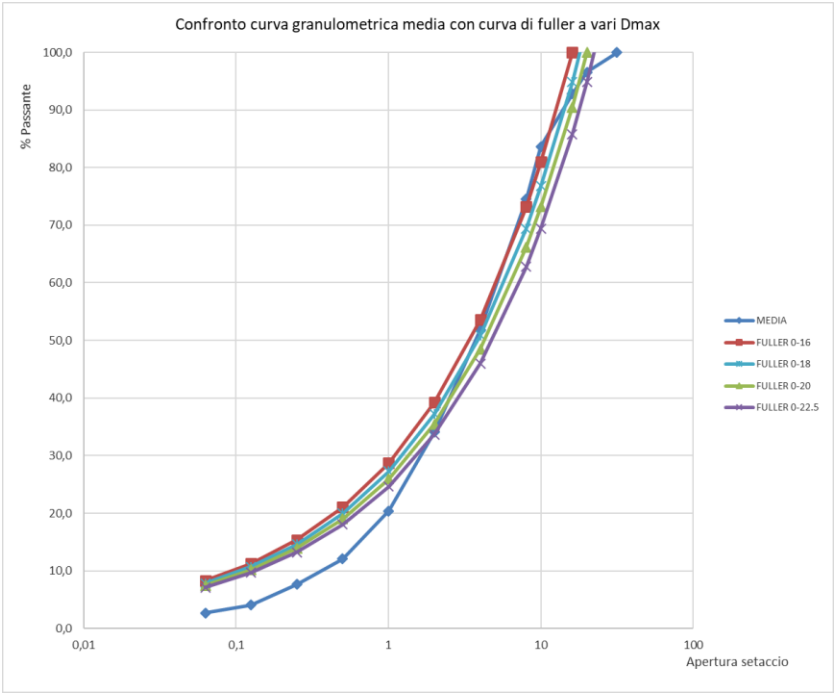

Figura 4.95 - Confronto curva granulometrica media con curve di Fuller a vari Dmax

Si è scelto di adottare la curva di Fuller con $D_{max} = 20\ mm$ 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 $D_{max} = 20\ mm$.

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
- 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 somma teglia + spatola + cono + pistone)
- ρw: massa volumica dell'acqua a T1

Da cui poi si è stati in grado di calcolare:

- ρa: massa volumica apparente dei granuli
- ρrd: massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa
- ρssd: massa volumica dei granuli in condizione SSA
- WA_{24}: Assorbimento dell'acqua

Di seguito vengono riportati i risultati:

- RAP gruppo Perugia1 grosso (4 – 31,5 mm)

M1 [g]	949,3
M2 [g]	4374,8
M3 [g]	3799,4
M4 [g]	934,3
T1 [°C]	25
ρw [g/cm3]	0,9971
tara1 [g]	715,9
Mssa [g]	1665,2
Mdry [g]	1650,2

T1	25
Tinf	25
ρwinf [g/cm3]	997,1
Tsup	25
ρwsup [g/cm3]	997,1
ρw [g/cm3]	997,10

ρA [g/cm3]	2,595683
ρRD [g/cm3]	2,49155
ρSSD [g/cm3]	2,531551
WA24	1,60548

Tabella 4.4 - Elaborazione picnometro pezzatura grossa gruppo Perugia1

- RAP gruppo Perugia2 grosso (4 – 31,5 mm)

M1 [g]	913,7
M2 [g]	4356,5
M3 [g]	3799,4
M4 [g]	903
T1 [°C]	22
ρw [g/cm3]	0,9978
tara1 [g]	715,9
Mssa [g]	1629,6
Mdry [g]	1618,9

T1	22
Tinf	22
ρwinf [g/cm3]	997,8
Tsup	22
ρwsup [g/cm3]	997,8
ρw [g/cm3]	997,80

ρA [g/cm3]	2,604838
ρRD [g/cm3]	2,526678
ρSSD [g/cm3]	2,556618
WA24	1,184939

Tabella 4.5 - Elaborazione picnometro pezzatura grossa gruppo Perugia2

- RAP gruppo Perugia 1 fino (0,063 – 4 mm)

M1 [g]	527,3
M2 [g]	3552,9
M3 [g]	3250,3
M4 [g]	508,7
T1 [°C]	23,5
ρw [g/cm3]	0,9975
tara1 [g]	879,7
Mssa [g]	527,3
Mdry [g]	508,7

T1	23,5
Tinf	23
ρwinf [g/cm3]	997,6
Tsup	24
ρwsup [g/cm3]	997,4
ρw [g/cm3]	997,50

ρA [g/cm3]	2,462048763
ρRD [g/cm3]	2,258247664
ρSSD [g/cm3]	2,340817757
WA24	3,656379005

Tabella 4.6 - Elaborazione picnometro pezzatura fina gruppo Perugia1

- RAP gruppo Perugia 2 fino (0,063 – 4 mm)

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

T1	22,8
Tinf	22
ρwinf [g/cm3]	998,5
Tsup	23
ρwsup [g/cm3]	998,3
ρw [g/cm3]	998,34

ρA [g/cm3]	2,478485439
ρRD [g/cm3]	2,329000359
ρSSD [g/cm3]	2,389213315
WA24	2,585356227

Tabella 4.5 - Elaborazione picnometro pezzatura fina gruppo Perugia2

4.2.1.3 Miscele di prova

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

sono state valutate sei diverse miscele:

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

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

	MEDIA	Fuller 0-20	Filler	Cemento	Sabbia	MIX_fase 1	Errore
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	%
31,5	100,0	100,0	100	100	100	100,0	0,0
20	100,0	100,0	100	100	100	100,0	0,0
16	96,1	90,4	100	100	100	96,3	5,9
10	86,6	73,2	100	100	100	87,4	14,2
8	77,2	66,2	100	100	100	78,5	12,3
4	53,7	48,5	100	100	98,3	56,5	8,0
2	35,3	35,5	100	100	73,7	39,1	3,7
1	21,1	26,0	100	100	44,5	25,8	0,1
0,5	12,5	19,0	100	100	28,4	17,8	1,3
0,25	7,9	13,9	98,6	100	22,9	13,4	0,5
0,125	4,2	10,2	90,2	100	16,3	9,6	0,6
0,063	2,8	7,5	77,6	100	12,2	7,7	0,3
FONDO	0,0	0	0	0	0	0,0	0,0

Figura 4.96 - Granulometrie componenti miscela MIX fase 1

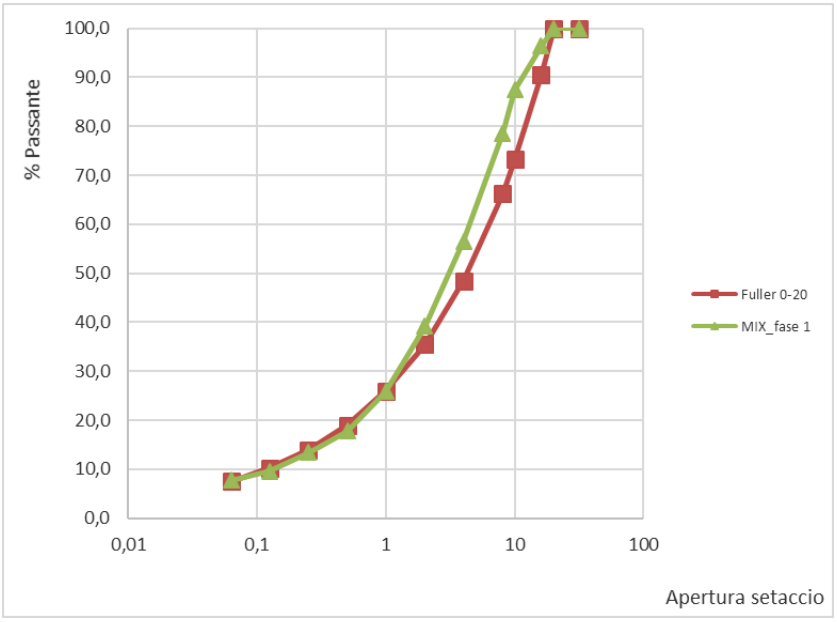

Figura 4.97 - Curve granulometriche MIX fase 1

4.2.1.3.2 MIX fase 2

La miscela MIX fase 2 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	Sabbia	Cemento	MIX_fase 2	Errore
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	0,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100,0	0,0
16	96,1	90,4	100,0	95,1	100	100	100	96,4	5,9
10	86,6	73,2	100,0	83,1	100	100	100	87,5	14,3
8	77,2	66,2	100,0	71,1	100	100	100	78,6	12,4
4	53,7	48,5	100,0	41,3	100	98,3	100	56,5	8,1
2	35,3	35,5	100,0	17,9	100	73,7	100	39,2	3,7
1	21,1	26,0	100,0	0,0	100	44,5	100	26,0	0,0
0,5	12,5	19,0	59,3	0,0	100	28,4	100	17,8	1,2
0,25	7,9	13,9	37,6	0,0	98,6	22,9	100	13,5	0,5
0,125	4,2	10,2	20,0	0,0	90,2	16,3	100	9,6	0,6
0,063	2,8	7,5	13,4	0,0	77,6	12,2	100	7,8	0,3
FONDO	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0

Figura 4.98 - Granulometrie componenti miscela MIX fase 2

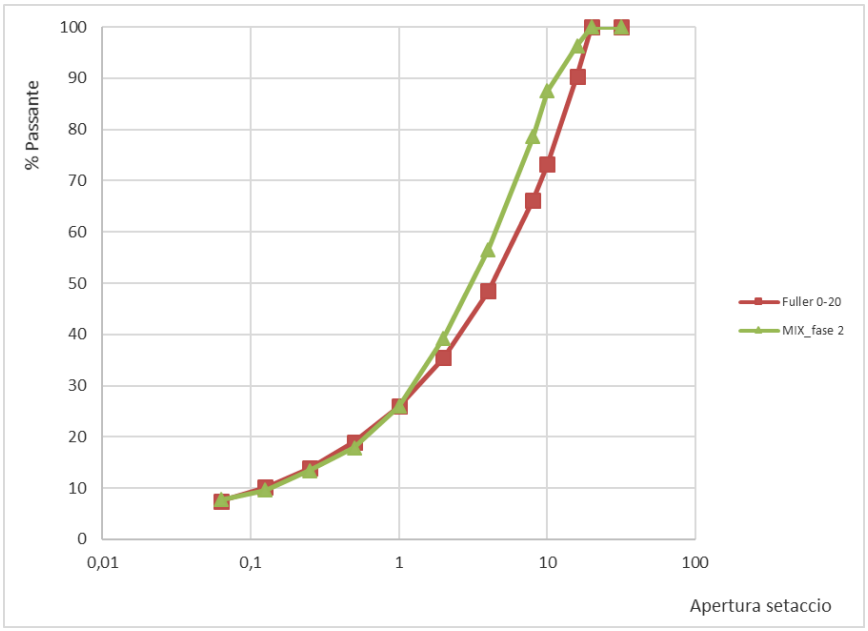

Figura 4.99 - Curve granulometriche MIX fase 2

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 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	Sabbia	Cemento	MIX_fase 3	Errore
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	%
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100,0	0,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100,0	0,0
16	96,1	90,4	100,0	100,0	83,0	100	100	100	94,1	3,6
10	86,6	73,2	100,0	100,0	41,4	100	100	100	79,5	6,3
8	77,2	66,2	100,0	100,0	0,0	100	100	100	65,0	1,2
4	53,7	48,5	100,0	58,1	0,0	100	98,3	100	48,2	0,2
2	35,3	35,5	100,0	25,2	0,0	100	73,7	100	35,1	0,4
1	21,1	26,0	100,0	0,0	0,0	100	44,5	100	25,0	1,0
0,5	12,5	19,0	59,3	0,0	0,0	100	28,4	100	17,3	1,7
0,25	7,9	13,9	37,6	0,0	0,0	98,6	22,9	100	13,1	0,8
0,125	4,2	10,2	20,0	0,0	0,0	90,2	16,3	100	9,4	0,8
0,063	2,8	7,5	13,4	0,0	0,0	77,6	12,2	100	7,7	0,2
FONDO	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0

Figura 4.100 - Granulometrie componenti miscela MIX fase 3

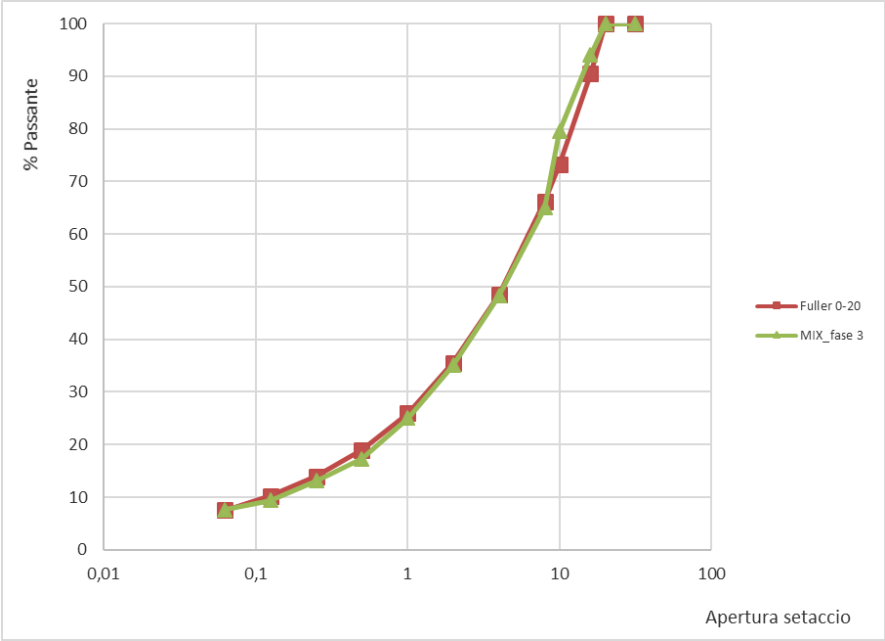

Figura 4.101 - Curve granulometriche MIX fase 3

4.2.1.3.4 MIX fase 4

- 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
- Sabbia calcarea 0 – 6 mm in quantità pari al 6% 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_0-4	Grosso_4-20	Filler	Sabbia (0-6)	Cemento	MIX_fase 4	Errore
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	0,0
20	100,0	100,0	100,0	95,3	100	100	100	97,6	2,4
16	96,1	90,4	100,0	87,3	100	100	100	93,4	2,9
10	86,6	73,2	100,0	67,8	100	100	100	83,3	10,1
8	77,2	66,2	100,0	48,3	100	100	100	73,1	6,9
4	53,7	48,5	100,0	0,0	100	98,3	100	47,9	0,6
2	35,3	35,5	65,7	0,0	100	73,7	100	34,1	1,4
1	21,1	26,0	39,4	0,0	100	44,5	100	22,9	3,1
0,5	12,5	19,0	23,4	0,0	100	28,4	100	16,1	2,9
0,25	7,9	13,9	14,8	0,0	98,6	22,9	100	12,6	1,3
0,125	4,2	10,2	7,9	0,0	90,2	16,3	100	9,4	0,8
0,063	2,8	7,5	5,3	0,0	77,6	12,2	100	7,7	0,3
FONDO	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0,0

Figura 4.102 - Granulometrie componenti miscela MIX fase 4

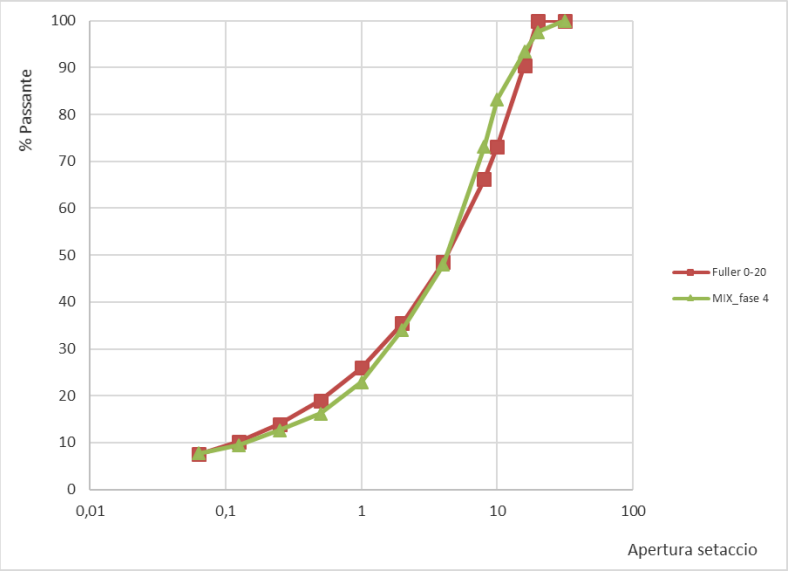

Figura 4.103 - Curve granulometriche MIX fase 4a

4.2.1.3.5 MIX fase 5

- RAP tal quale 0 - 20 mm in quantità pari al 8% in peso della miscela
- 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
- Sabbia calcarea 0 – 6 mm in quantità pari al 6% 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_0-4	Grosso_4-20	Filler	Sabbia (0-6)	Cemento	MIX_fase 6	Errore
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	0,0
20	100,0	100,0	100,0	95,3	100	100	100	97,8	2,2
16	96,1	90,4	100,0	87,3	100	100	100	93,7	3,3
10	86,6	73,2	100,0	67,8	100	100	100	83,8	10,6
8	77,2	66,2	100,0	48,3	100	100	100	73,9	7,7
4	53,7	48,5	100,0	0,0	100	98,3	100	49,2	0,7
2	35,3	35,5	65,7	0,0	100	73,7	100	34,9	0,6
1	21,1	26,0	39,4	0,0	100	44,5	100	23,4	2,6
0,5	12,5	19,0	23,4	0,0	100	28,4	100	16,4	2,6
0,25	7,9	13,9	14,8	0,0	98,6	22,9	100	12,8	1,1
0,125	4,2	10,2	7,9	0,0	90,2	16,3	100	9,5	0,7
0,063	2,8	7,5	5,3	0,0	77,6	12,2	100	7,8	0,3
FONDO	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0,004

Figura 4.104 - Granulometrie componenti miscela MIX fase 5

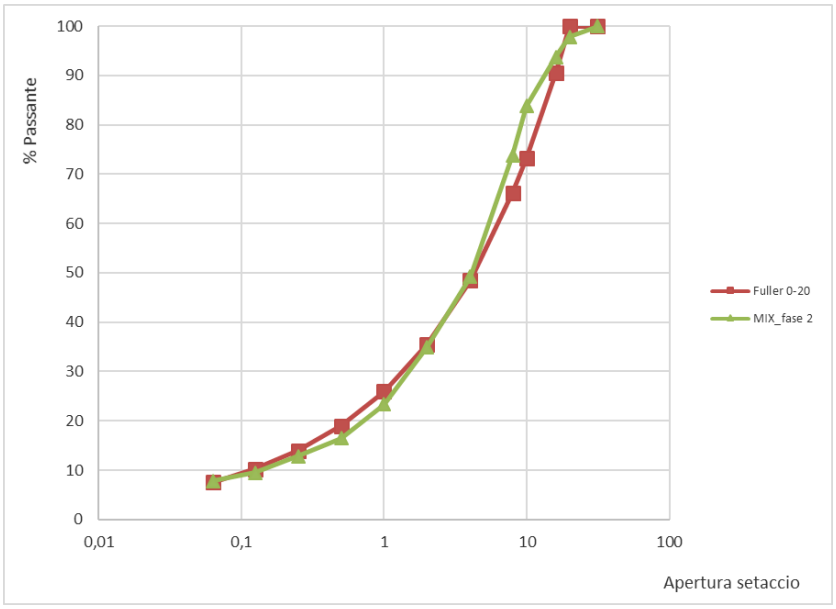

Figura 4.105 - Curve granulometriche MIX fase 5

La miscela MIX fase 3 è stata quella scelta perché risultata quella più aderente alla curva di Fuller 0 – 20.

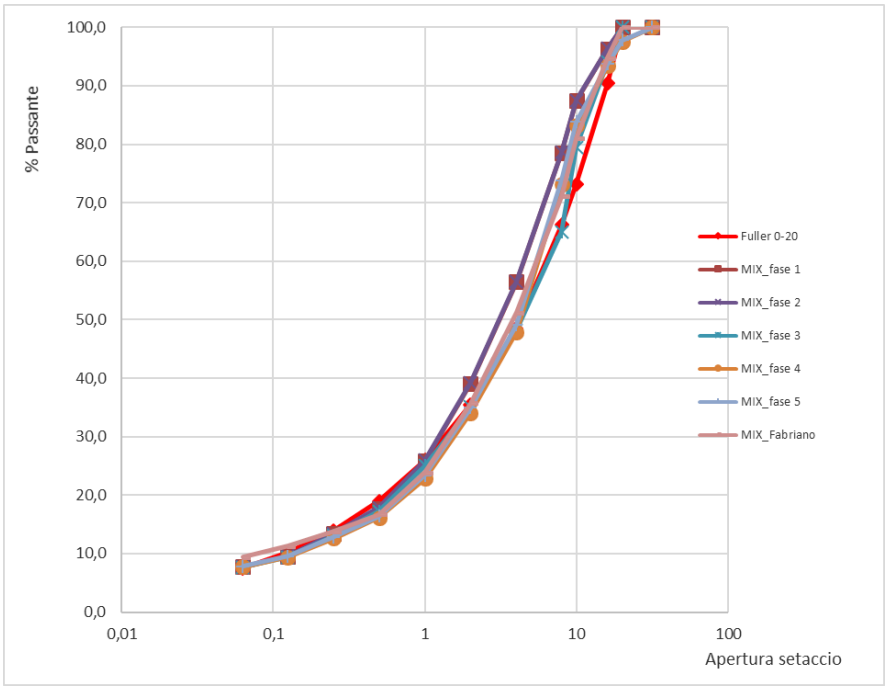

Figura 4.106 - Confronto granulometrico tra le varie miscele della fase preliminare

4.2.2 Scelta della miscela definitiva

Alla luce dei risultati ottenuti si è andati a definire la miscela definitiva con cui procedere alla sperimentazione. 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
- Fibre, solo nella seconda miscela, pari allo 0,02% della 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, indicate con la lettera F.

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 due tipologie diverse di provini mantenendo un diametro costante di 150 mm:

- N. 22 provini *"piccoli"* 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 4.107 - Provini "piccoli"

N. 10 provini *"grandi"* costipati con pressa giratoria imponendo un numero fisso di giri pari a 120 e caratterizzati da un'altezza post compattazione circa pari a 165 mm.

Figura 4.108 - Provino "grande"

La non esattezza dell'altezza post compattazione deriva dal fatto che il progetto della miscela viene eseguito impostando a monte una percentuale di vuoti del 10%; poi, in base al valore ρ_m, si determina la massa della miscela necessaria per la realizzazione di un singolo provino avente una determinata altezza post compattazione e un determinato tenore di vuoti.

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

- Lettera da A a Z per indicare cronologicamente l'impasto;
- Lettera R o F0.2 per indicare la famiglia, quindi se sono presenti o no le fibre;
- Numero:
    - Nel caso di provini piccoli il numero è arabo crescente da 1 a 100 in ordine di realizzazione del singolo provino.
    - Nel caso di provini grandi il numero è romano crescente da I a C in ordine di realizzazione del singolo provino.

Quindi ad esempio il nome EF0.2_18 indica un provino realizzato durante il quinto impasto (lettera E) della miscela con fibre (lettera F0.2) ed è il diciottesimo (18) provino piccolo (numero arabo) realizzato per la famiglia F.

Sui provini *"piccoli"* 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.

I provini *"grandi"* invece sono stati carotati con la macchina carotatrice, e successivamente tagliati, dopo 30 giorni di maturazione a 40°C, per ottenere provini di dimensioni ottimali per:

- Prove di modulo complesso a compressione dopo 30 giorni
- Prove di fatica dopo 30 giorni

Figura 4.109 - Macchina carotatrice

Figura 4.110 - Provino "grandi" carotato

Figura 4.111 - Provino "grande" carotato in modo da ottenere un provino per la prova di modulo complesso a compressione

In particolare, da ogni provino *"grande"* è stato possibile ricavare un provino per la prova di modulo complesso oppure due provini, nominati rispettivamente *sup* e *inf*, per la prova di fatica.

Figura 4.112 - Provino "grande" carotato per ottenere due provini per prova di fatica

Riassumendo quindi, in fase di confezionamento sono stati prodotti i seguenti provini:

Famiglia	Tipo di provino	Codifica impasti	Numero di provini prodotti	Numero di test effettuati				
				Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)	Prova di rottura a trazione indiretta (ITS)	Sensibilità all' acqua	Prova di modulo complesso a compressione (E*)	Prova di fatica
R	PICCOLO	CR	6	3	3			
		DR	5	3	2			
		ER	5	2	3			
		GR	6			6		
	GRANDE	AR	4					4
		BR	3				2	1
		FR	3				1	2
F0.2	PICCOLO	CF0.2	6	3	3			
		DF0.2	5	3	2			
		EF0.2	5	2	3			
		GF0.2	6			6		
	GRANDE	AF0.2	4					4
		BF0.2	3				2	1
		FF0.2	3				1	2

Tabella 4.6 - Numero di test effettuati per ogni tipologia di prova

Capitolo 5 - Analisi dei risultati

Di seguito si descrivono i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui provini delle due famiglie di conglomerato a freddo studiate.

Come già detto nel capitolo 4, come prima cosa si fa uno studio preliminare sul RAP, attraverso l'analisi granulometrica per vibrovagliatura e studio della massa volumica attraverso picnometro.

A questo punto si sono ipotizzate 5 diverse miscele e si è definita la miscela definitiva e sono stati confezionati i provini per due diverse famiglie, quella di riferimento e quella con le fibre.

I provini sono stati compattati con la pressa a taglio giratoria e sono stati posizionati in stufa a 40°C per trenta giorni.

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

- Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità
- Perdita di acqua
- Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)
- Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)
- Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS
- Prove di Fatica
- Prove di Modulo Complesso a Compressione

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 piccoli 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_21; GR_22;
- Le Prove di Fatica sono state eseguite su provini opportunamente carotati e tagliati ricavati dai seguenti provini grandi:
  AR_I; AR_II; AR_III; AR_IV; BR_V; FR_IX; FR_X
- Le Prove di Modulo Complesso a Compressione hanno riguardato i seguenti provini:

  BR_VI; BR_VII; FR_VIII

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.

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*

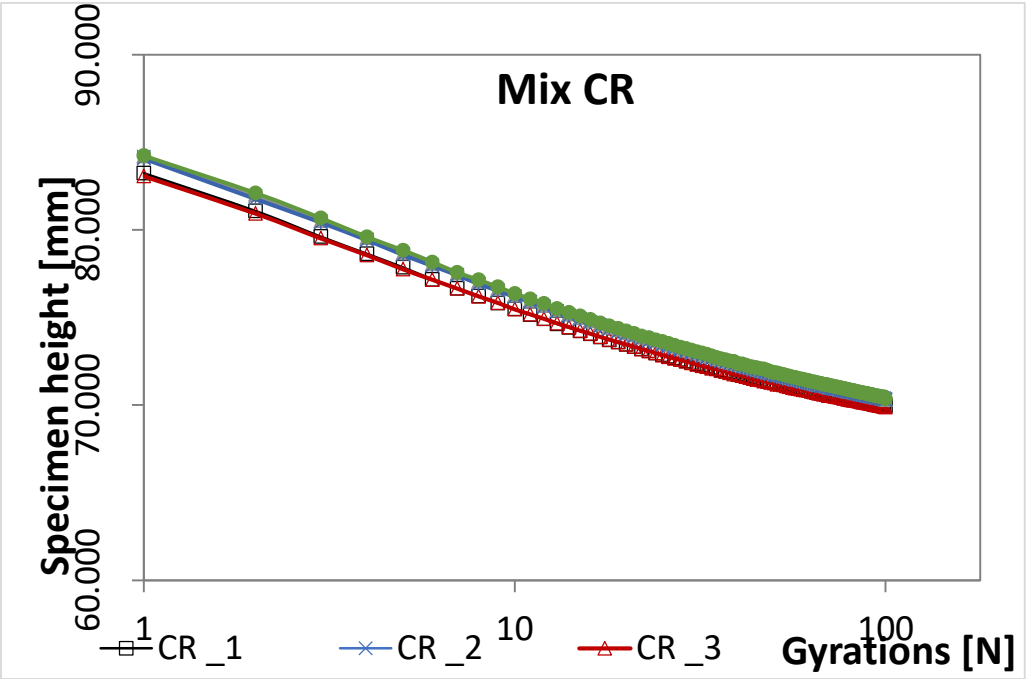

Figura 5.1 - Curve di compattazione provini dell'impasto CR

	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*

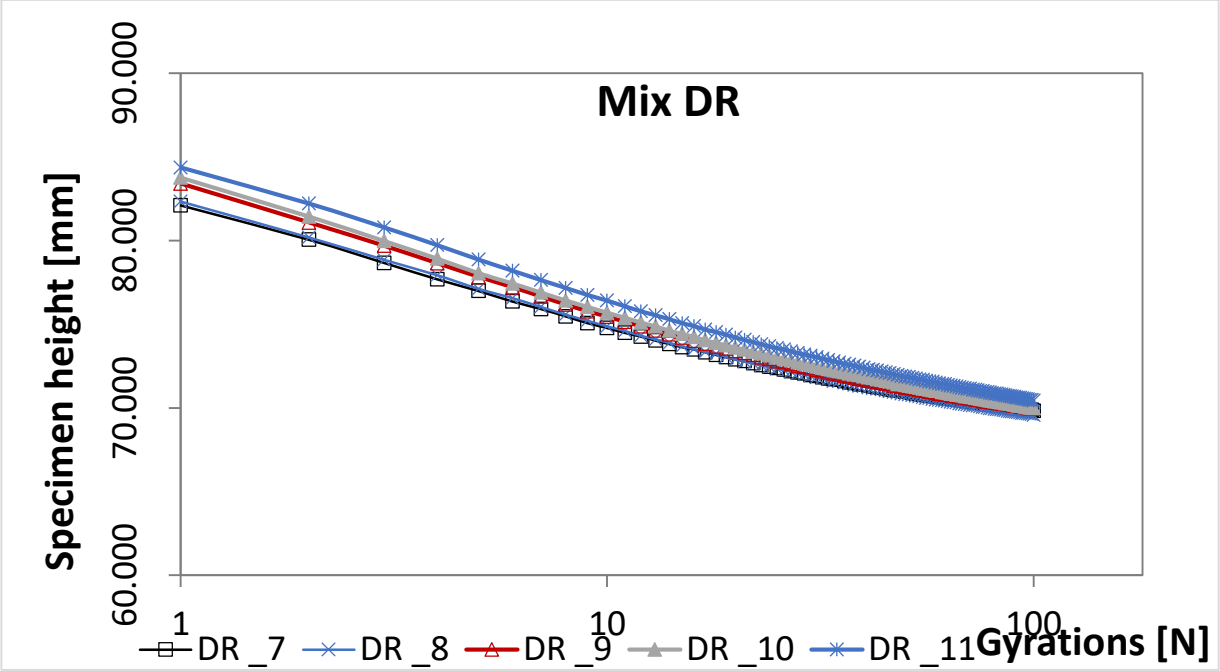

Figura 5.2 - Curve di compattazione provini dell'impasto DR

	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 5.2 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto DR

5.1.1.3 *Impasto ER*

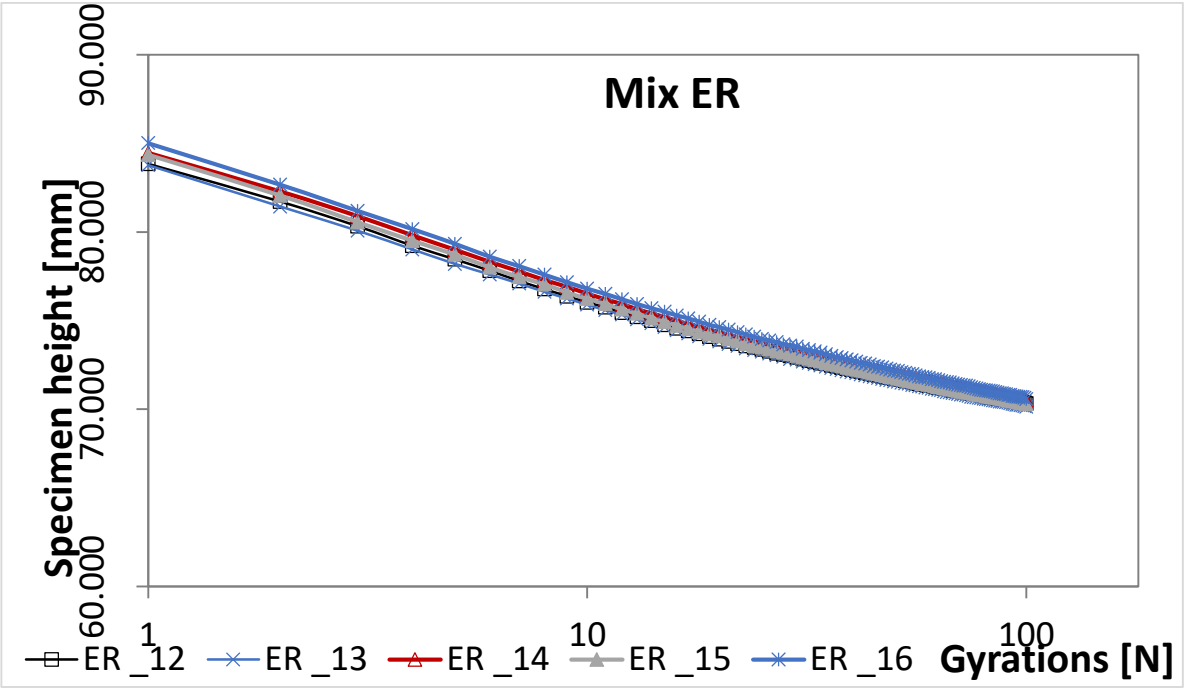

Figura 5.3 - Curve di compattazione provini dell'impasto ER

	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 5.3 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto ER

5.1.1.4 Impasto GR

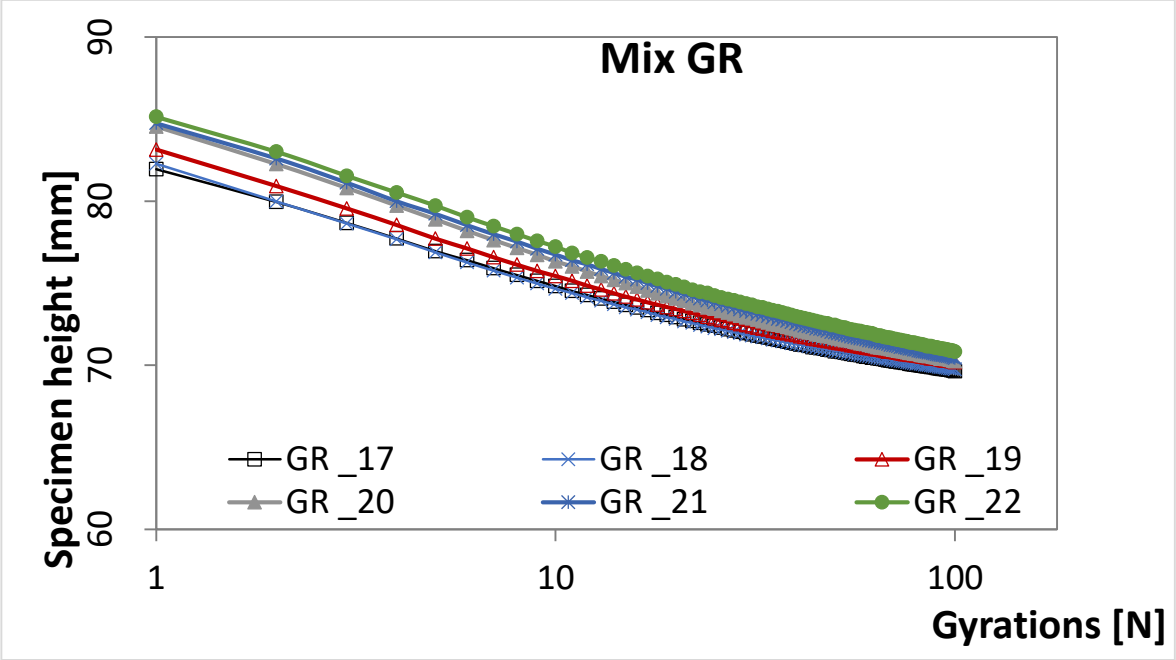

Figura 5.4 - Curve di compattazione provini dell'impasto GR

	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 5.4 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto GR

5.1.2 Perdita di acqua

5.1.2.1 Impasto CR

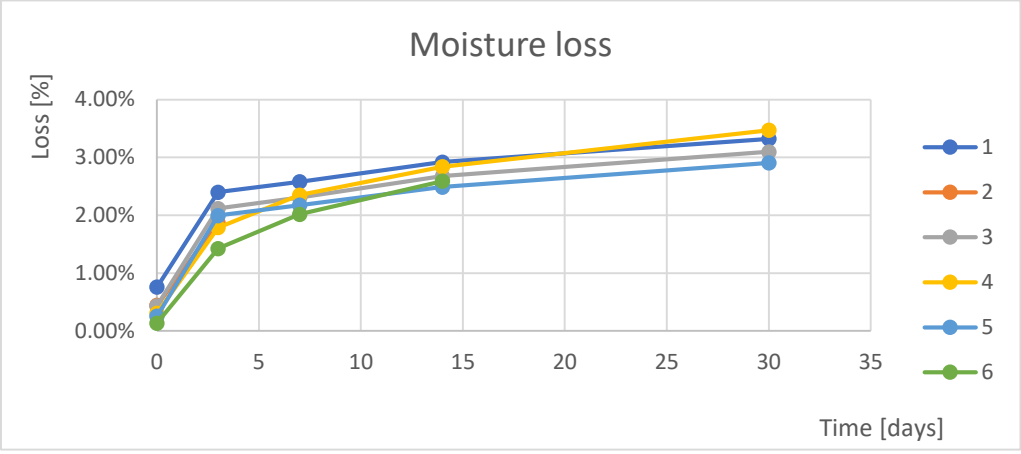

Figura 5.5 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto CR

5.1.2.2 Impasto DR

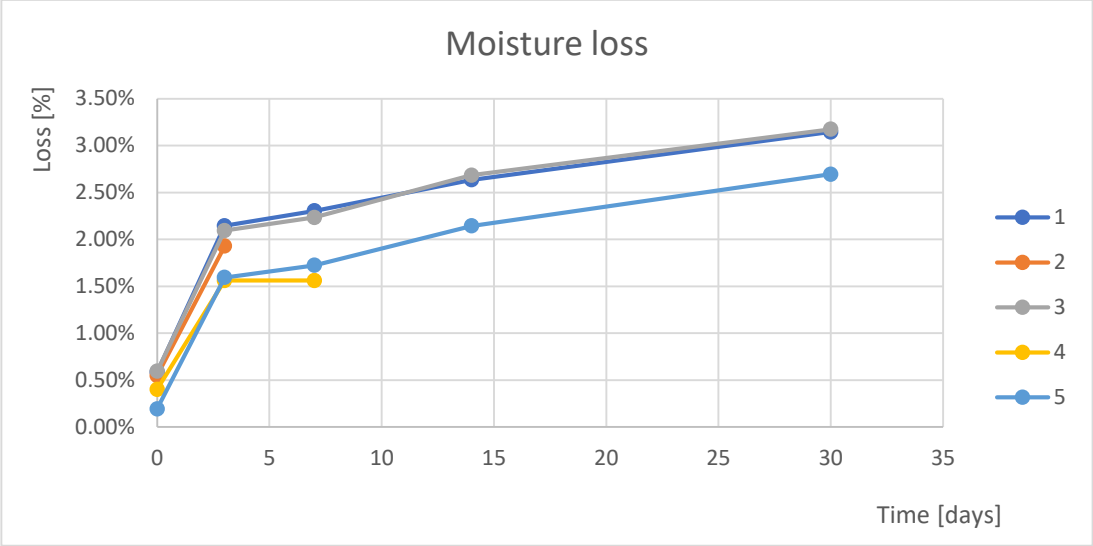

Figura 5.6 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto DR

5.1.2.3 Impasto ER

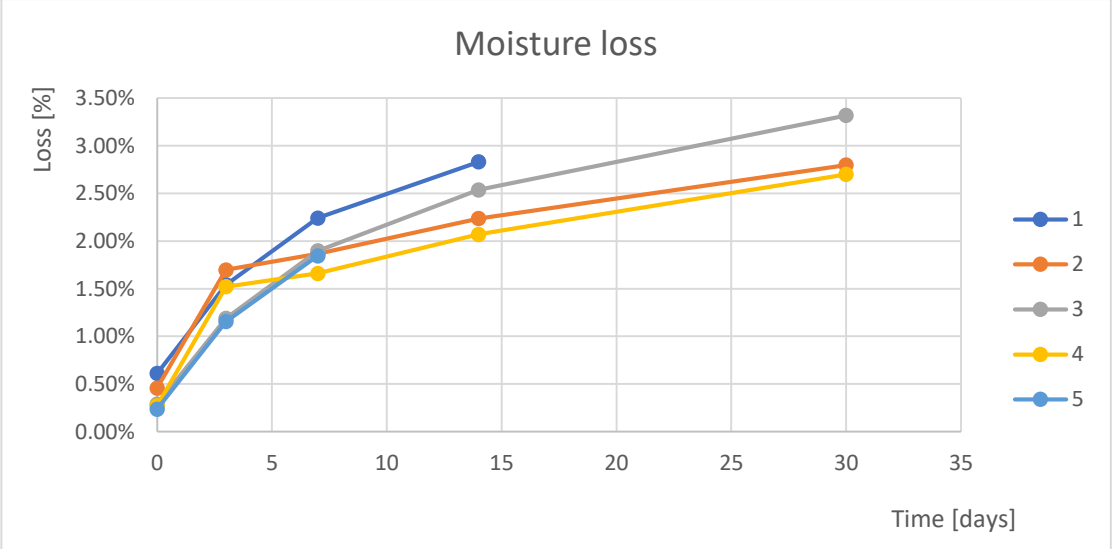

Figura 5.7 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto ER

5.1.3 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 $ITSM_m$.

	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
Codice	$ITSM_1$ [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 5.5 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia riferimento

Si nota come il valore dei moduli cresca nel tempo: ciò dipende all'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:

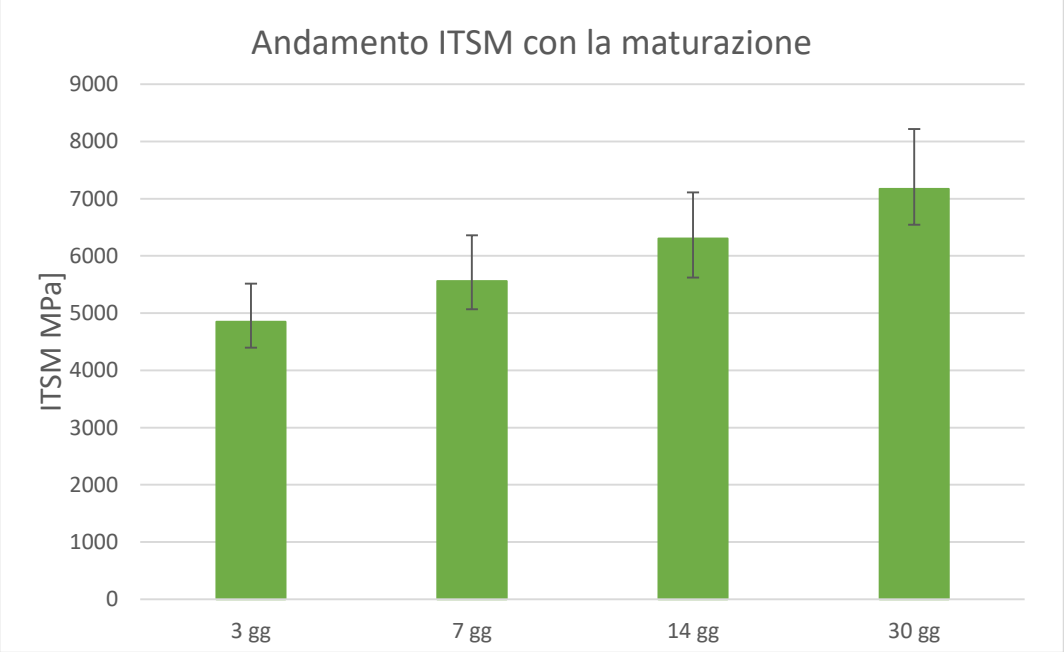

Figura 5.8 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia riferimento

5.1.4 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
Codice	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 5.6 - Valori ITS nel tempo per la famiglia riferimento

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

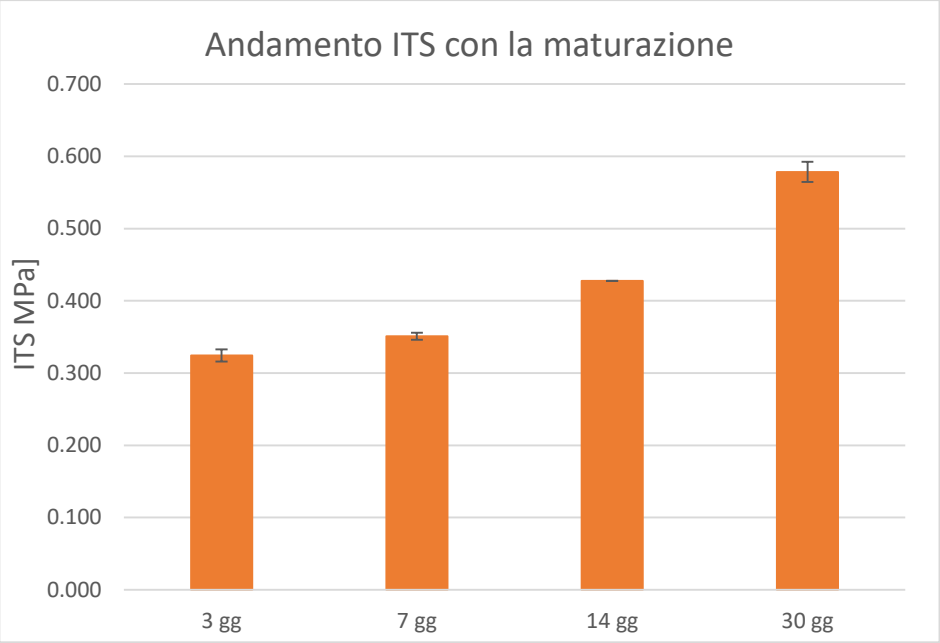

Figura 5.9 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia riferimento

5.1.4.1 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 e l'area sottesa, che corrisponde all' energia totale. Inoltre si calcolano l'energia fino alla rottura (E_1), e dopo la rottura (E_2). Tutte queste energia 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.

5.1.4.1.1 ***Provini a 3 gg***

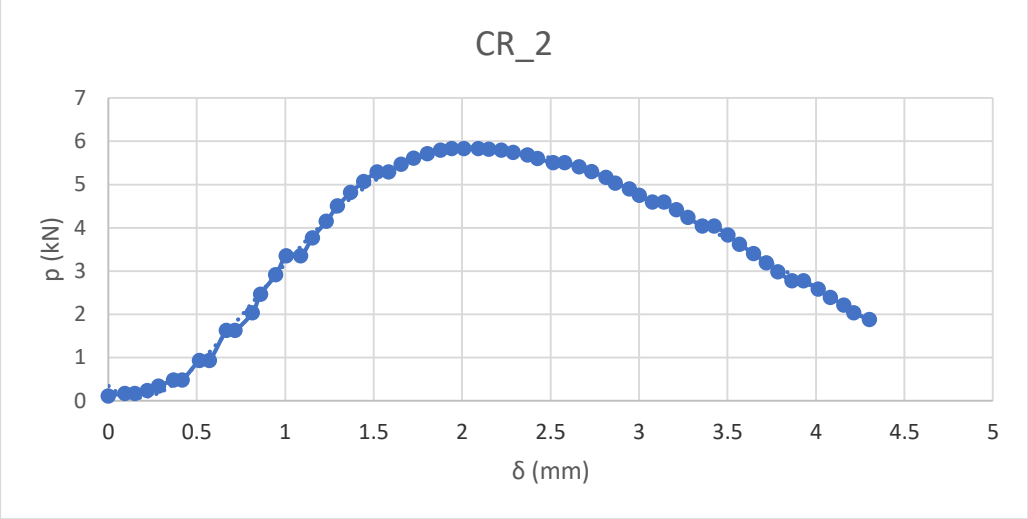

Figura 5.10 - Andamento ITSM, per il provino CR_2

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

Tabella 5.7 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino CR_2

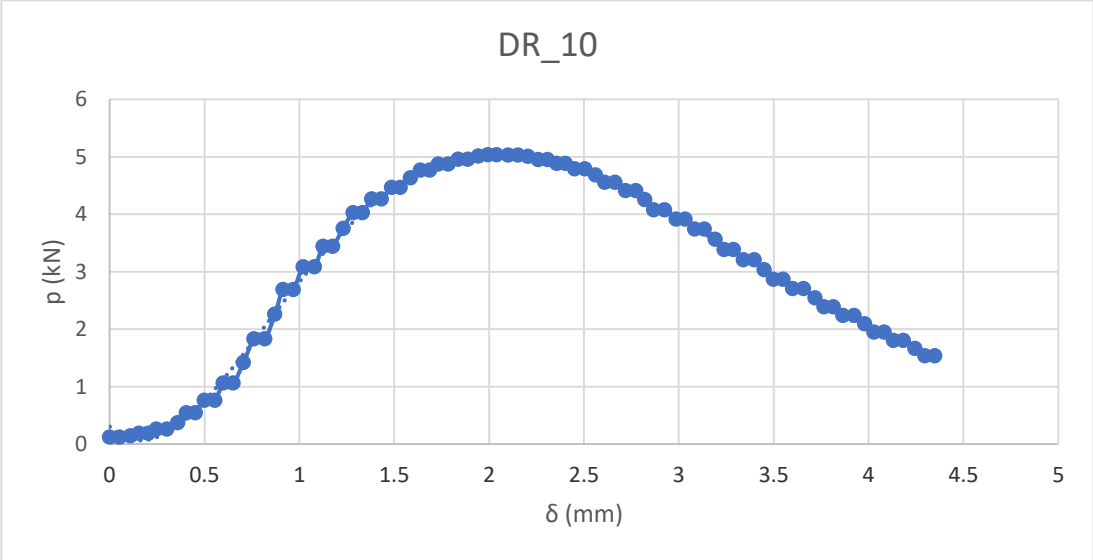

Figura 5.11 - Andamento ITSM, per il provino DR_10

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

Tabella 5.8 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino DR_10

5.1.4.1.2 ***Provini a 7 gg***

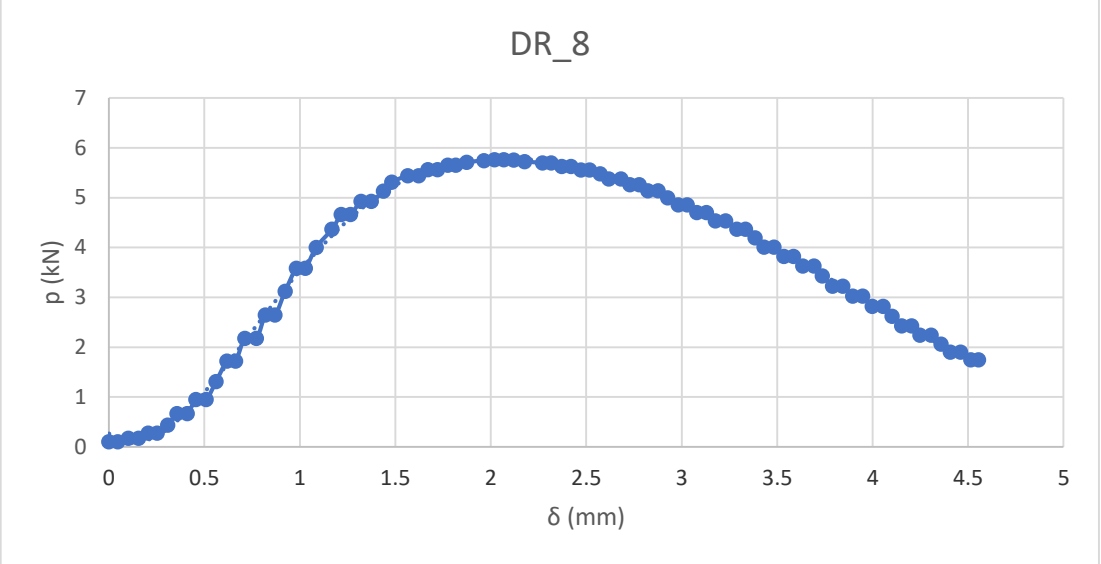

Figura 5.12 - Andamento ITSM, per il provino DR_8

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

Tabella 5.9 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino DR_8

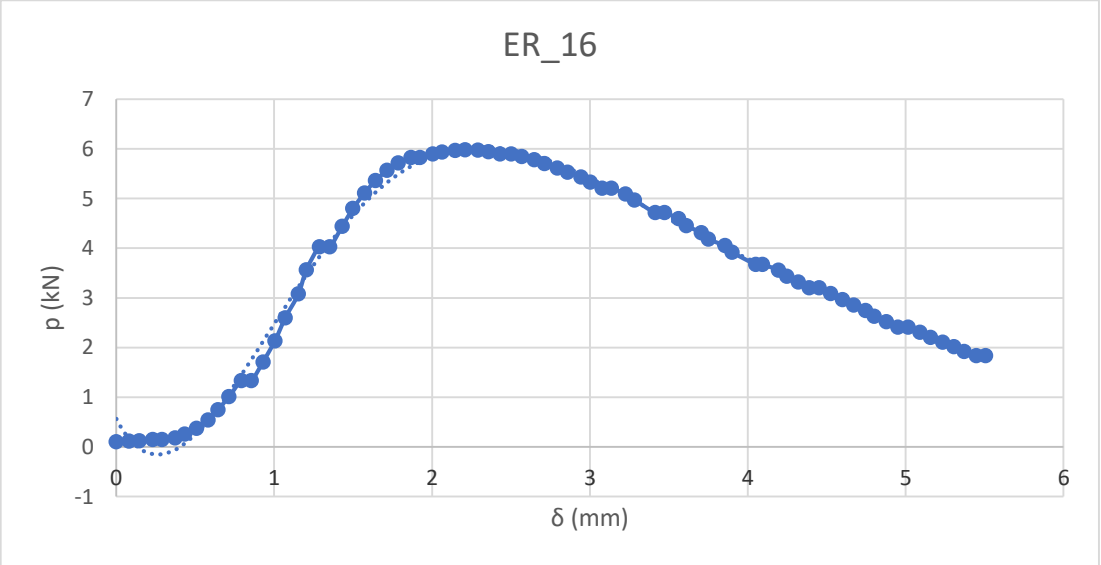

Figura 5.13 - Andamento ITSM, per il provino ER_16

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

Tabella 5.10 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino ER_16

5.1.4.1.3 ***Provini a 14 gg***

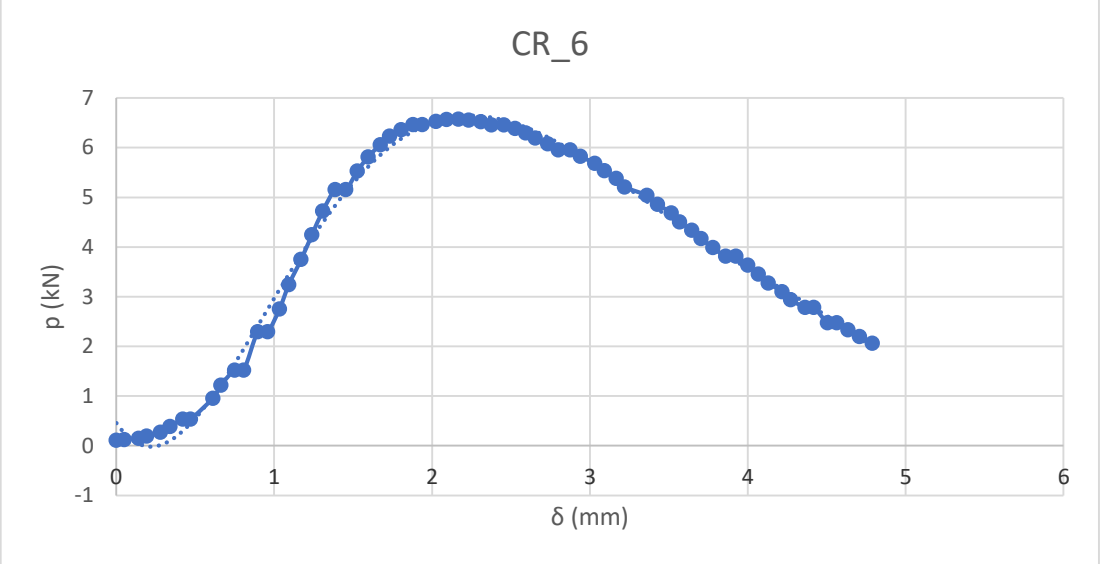

Figura 5.14 - Andamento ITSM, per il provino CR_6

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

Tabella 5.11 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino CR_6

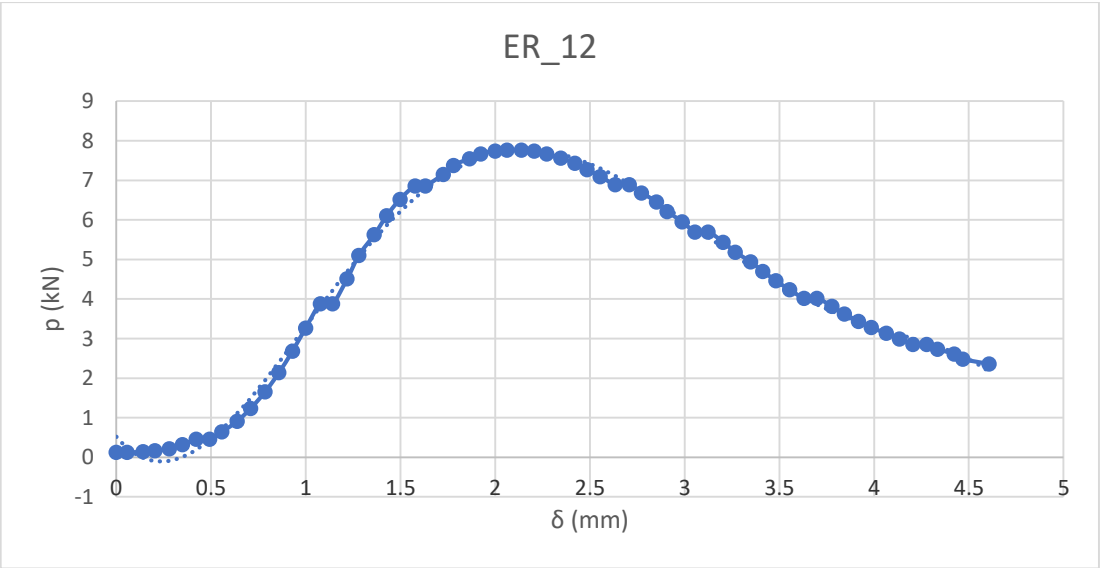

Figura 5.15 - Andamento ITSM, per il provino ER_12

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

Tabella 5.12 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino ER_12

5.1.4.1.4 ***Provini a 30 gg***

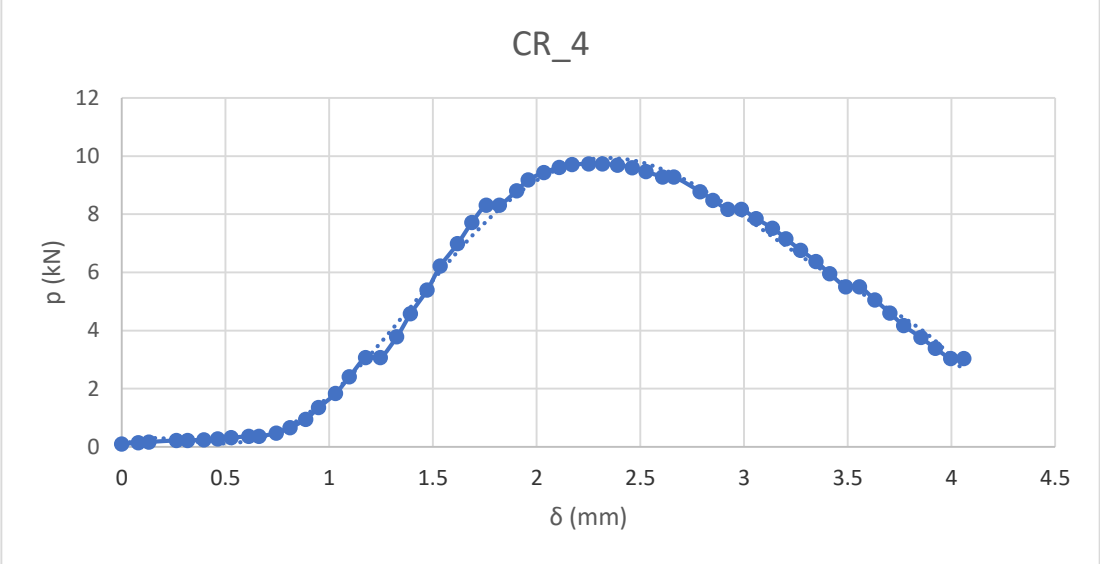

Figura 5.16 - Andamento ITSM, per il provino CR_4

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

Tabella 5.13 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino CR_4

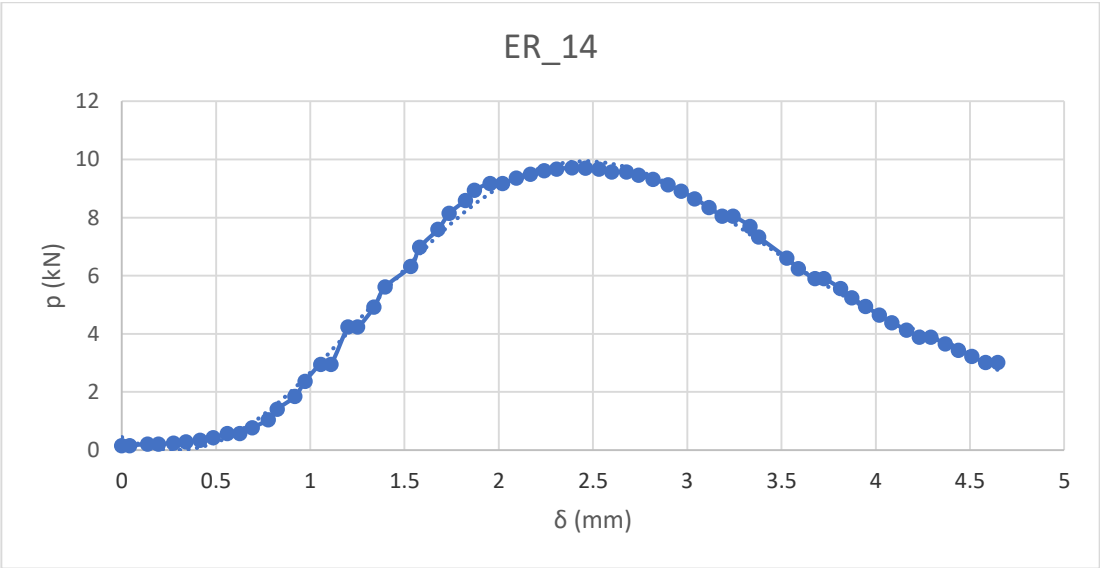

Figura 5.17 - Andamento ITSM, per il provino DR_8

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
6,38	25,58	10,60	14,98

Tabella 5.14 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino DR_8

5.1.5 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS

	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr
Codice	ε_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	[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 5.15 - 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, calcolato come:

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

I risultati sono stati anche graficati:

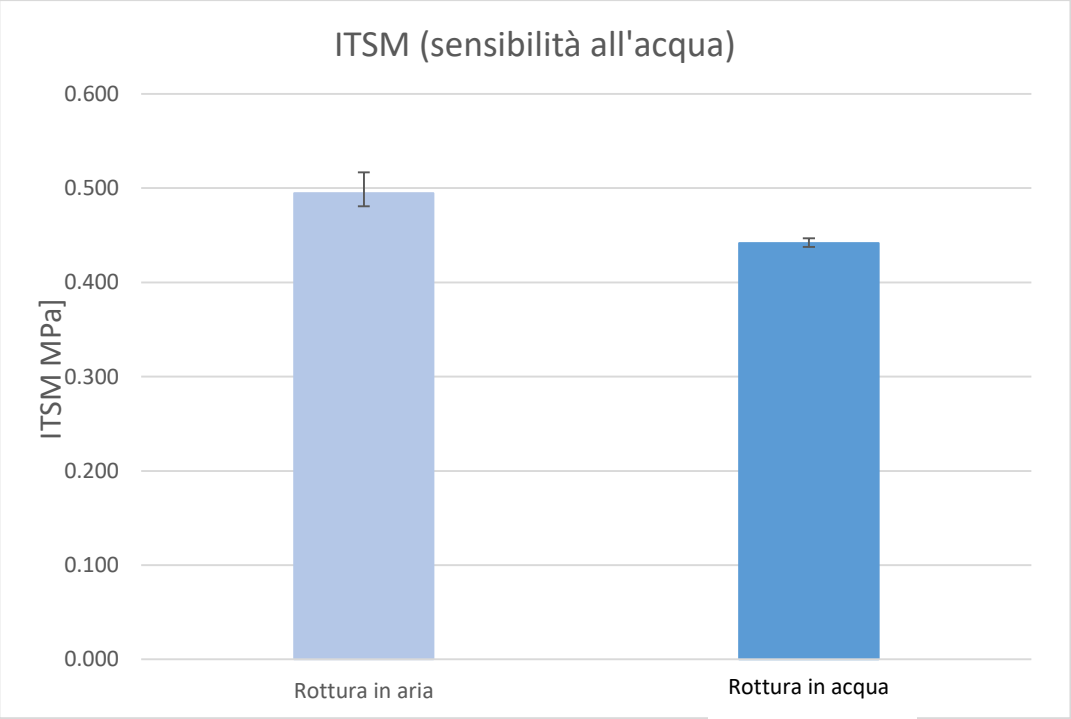

Figura 5.18 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia riferimento

5.1.6 Prove di Fatica

I provini sono stati sottoposti a prove ITSM preliminari per determinare il modulo di rigidezza in trazione indiretta. In base a questi risultati sono stati stimati i valori della tensione imposta iniziale $\sigma_{effettivo}$ da inserire nel software ITFT. Dopo i primi 115 cicli, il software fornisce il valore della deformazione iniziale ε_0, utile a determinare le curve di fatica di seguito riportate.

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{effettivo}$ [MP	ε_0	n° cicli
AR_I sup	56,9	94	7317	300	210	14000
AR_I inf		94,1	7096	275	199	48500
AR_II sup	48,5	94,1	9100	425	239	1665
AR_II inf	55,1	94,1	7819	350	214	28000
AR_III sup	49,6	94,1	8076	325	125	341000
AR_III inf	53,2	94,1	9023	400	223	11000
AR_IV sup	57,1	94,1	8175	350	304	2000
AR_IV inf	53,5	94,1	8621	375	184	14910
BR_V sup		94,1	7052	250	131	1215000
BR_V inf		94,1	6785	350	449	685
FR_IX sup	55,5	93,9	6349	275	208	37500
FR_IX inf	54,0	94,1	6290	300	164	46000
FR_X sup	54,0	93,9	6226	375	267	4015
FR_X inf	51,3	94,1	7312	375	191	24935

Tabella 5.16 - Risultati prove di fatica famiglia riferimento

Sono state inoltre riportate le curve di fatica in scala bilogaritmica.

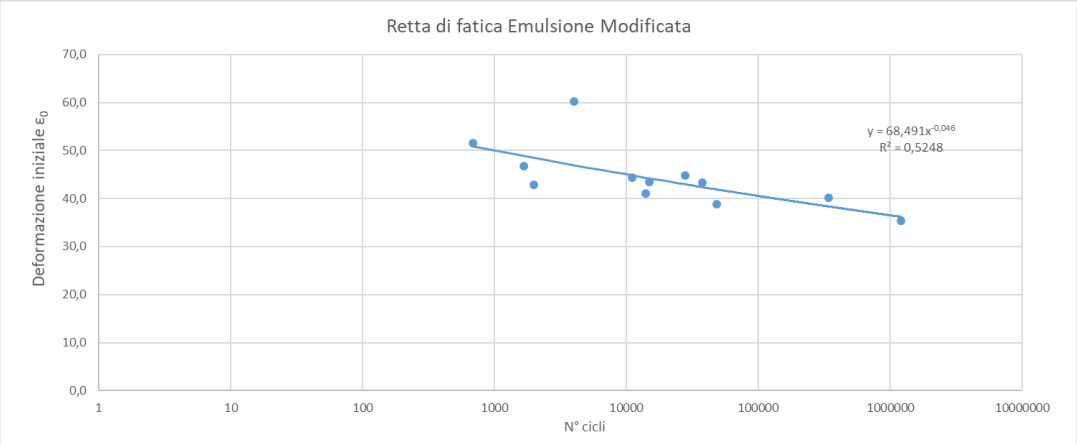

Figura 5.89 - Retta di fatica (N° cicli; ε_0) riferimento

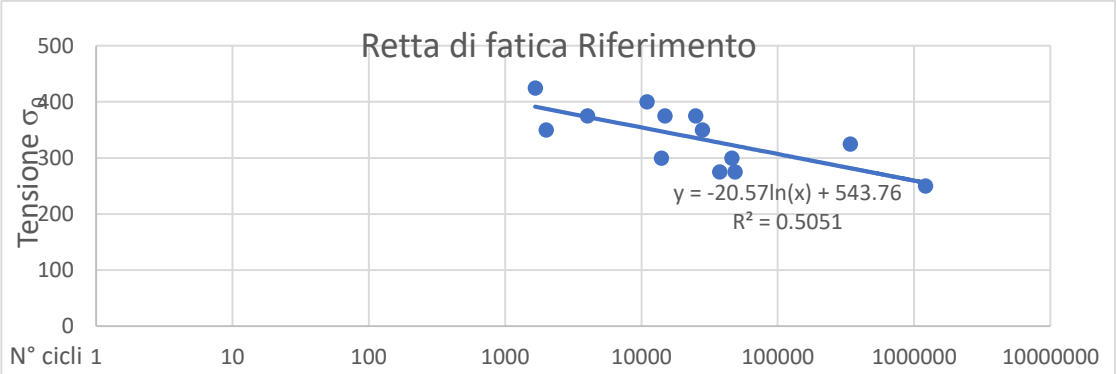

Figura 5.20 - Retta di fatica (N° cicli; σ_0) riferimento

5.1.7 *Prove di Modulo Complesso a Compressione e Curve Maestre*

Le prove sono state eseguite su tre provini utilizzando il macchinario UTM-30. I risultati sono stati riportati di seguito, suddivisi per singolo provino, nel seguente ordine:

- Dimensioni geometriche
- Risultati prove di modulo complesso a compressione, basati sulle dimensioni geometriche post spianamento
- Curve Maestre

5.1.7.1 *Provino BR VI*

Codice	Processo	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_m [mm]	D [mm]
BR_VI	Pre spianamento	113,5	113,8	113,9	113,5	113,7	95,075
	Post spianamento	117,8	116,8	117,9		117,5	

Tabella 5.17 - Dimensioni geometriche del provino BR_VI

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	7392	7071	6842	6550	6319	6315	5898	5727
Phase angle [°]	5,83	6,24	6,46	6,69	6,89	6,93	7,05	7,07

20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	5983	5664	5404	5106	4867	4656	4393	4222
Phase angle [°]	6,31	6,88	7,1	7,4	7,85	8,09	8,33	8,45

35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	4134	3829	3538	3181	2920	2685	2400	2209
Phase angle [°]	9,74	10,74	11,6	12,57	12,93	13,57	13,74	14,27

50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	3204	2875	2610	2294	2074	1901	1691	1559
Phase angle [°]	14,09	14,12	14,14	14,4	14,45	14,36	13,89	13,67

Tabella 5.78 - Risultati prova modulo complesso provino BR_VI

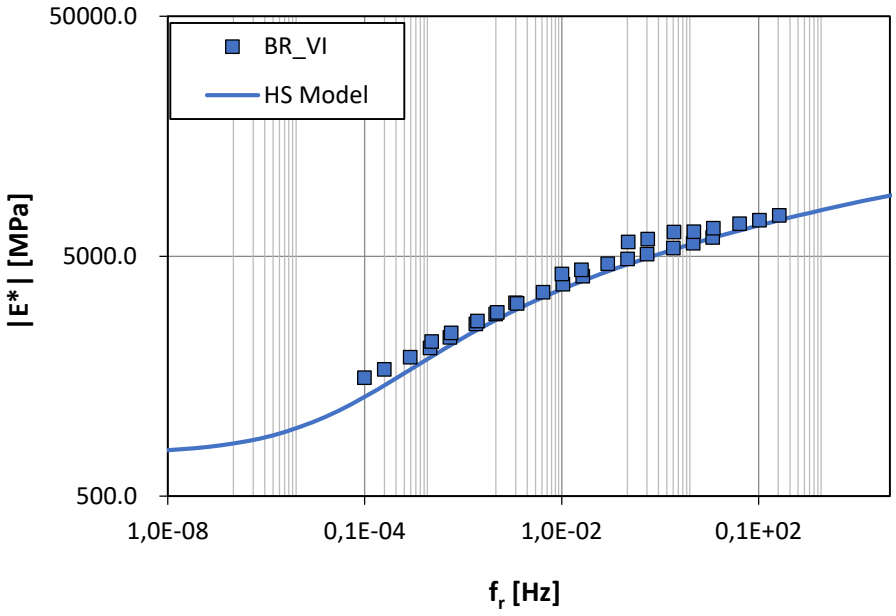

Figura 5.21 - Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BR_VI

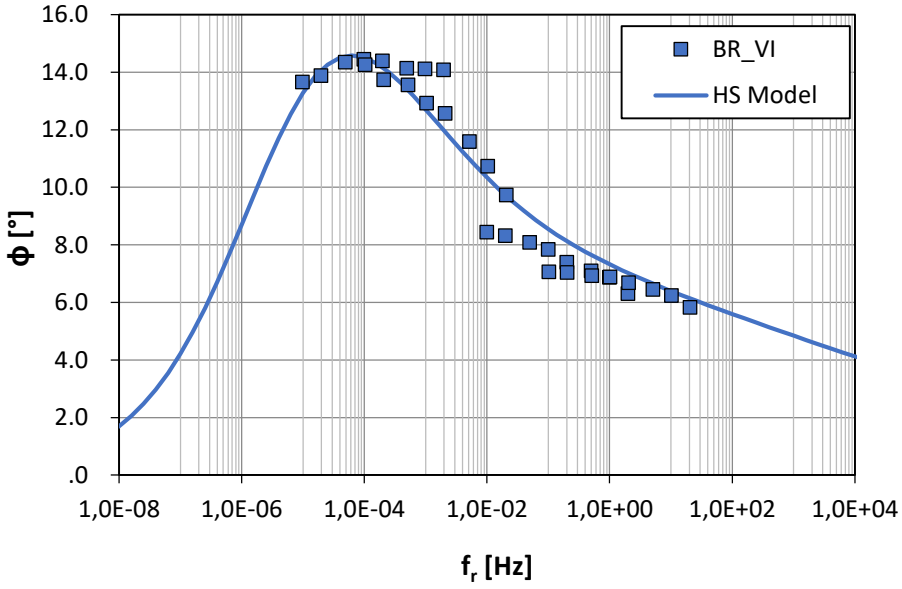

Figura 5.22 - Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BR_VI

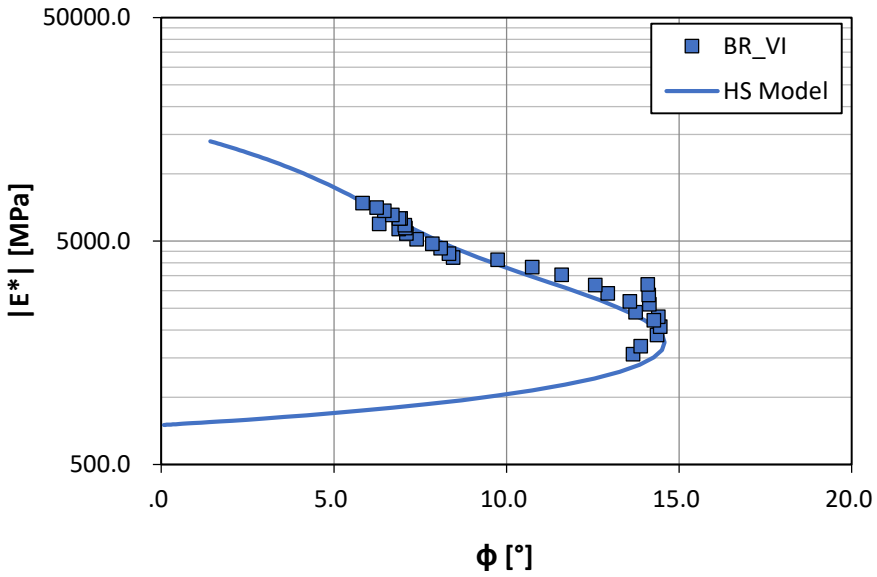

Figura 5.239 - Diagramma di Black del provino BR_VI

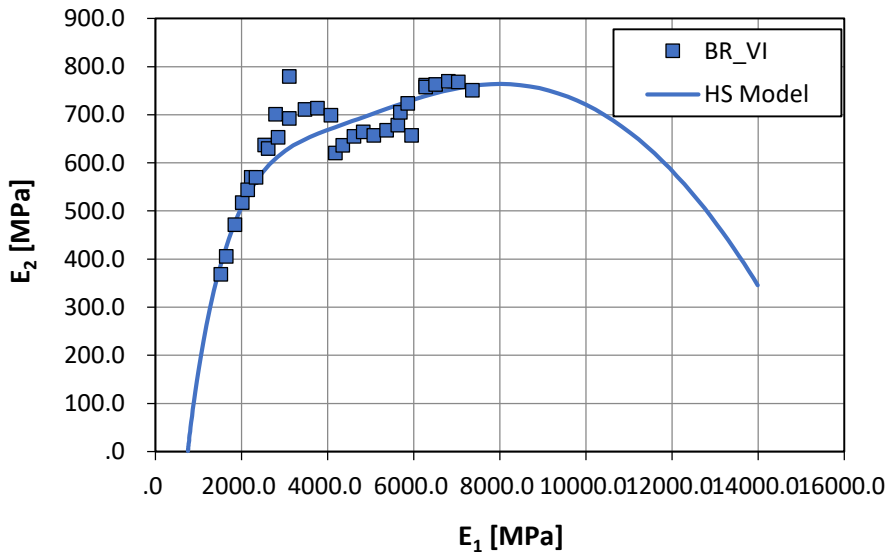

Figura 5.24 - Diagramma di Cole-Cole per il provino BR_VI

5.1.7.2 ***Provino BR VII***

Codice	Processo	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_m [mm]	D [mm]
BR_VII	Pre spianamento	112	111,5	113,6	113,6	112,675	94,8
	Post spianamento						

Tabella 5.19 - Dimensioni geometriche del provino BR_VII

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	7013	6804	6595	6294	5963	5758	5550	5406
Phase angle [°]	5,15	5,45	5,95	6,44	6,38	6,28	6,42	6,67

20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	6569	6217	5905	5499	5219	4939	4635	4376
Phase angle [°]	7,12	7,61	8,22	8,72	9,04	9,26	9,83	10,12

35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	5285	4882	4535	4059	3686	3329	2992	2753
Phase angle [°]	10,04	10,58	10,91	11,4	11,45	11,81	13,18	13,19

50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	2896	2458	2092	1694	1441	1299	1153	1036
Phase angle [°]	15,12	15,55	15,64	15,35	14,91	14,28	13,19	12,87

Tabella 5.20 - Risultati prova modulo complesso provino BR_VII

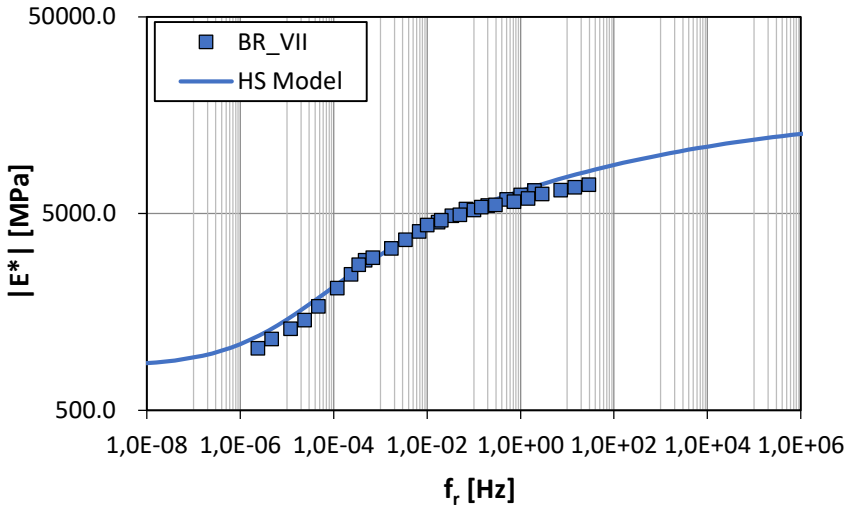

Figura 5.25 - Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BR_VII

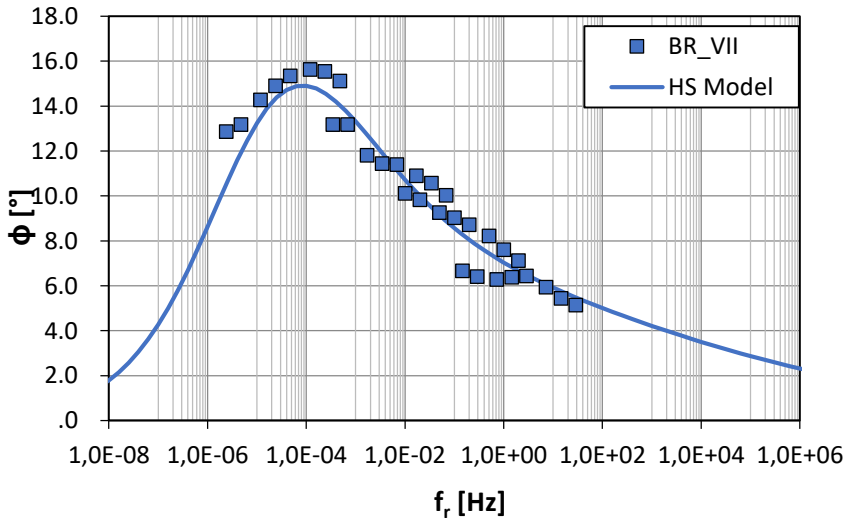

Figura 5.2610 - Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BR_VII

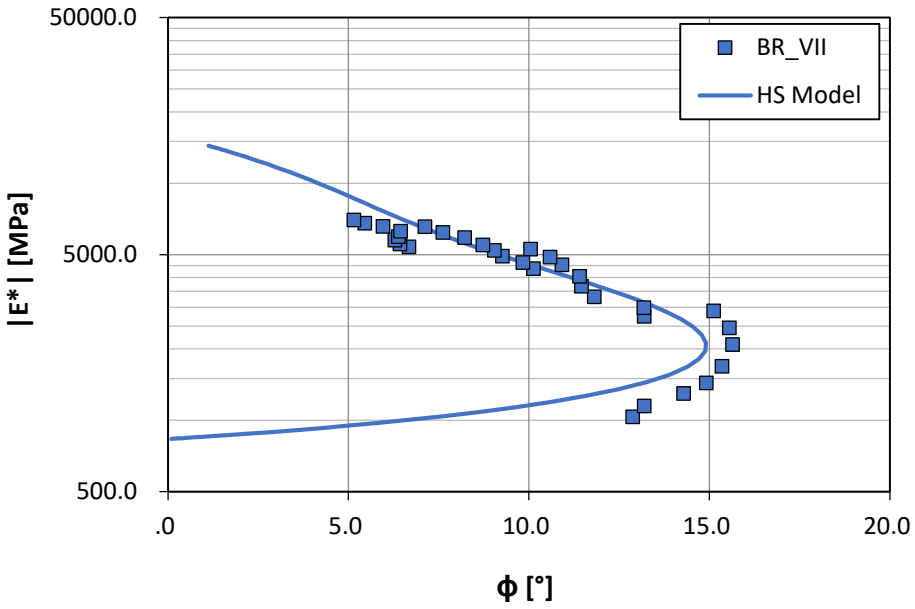

Figura 5.27 - Diagramma di Black del provino BR_VII

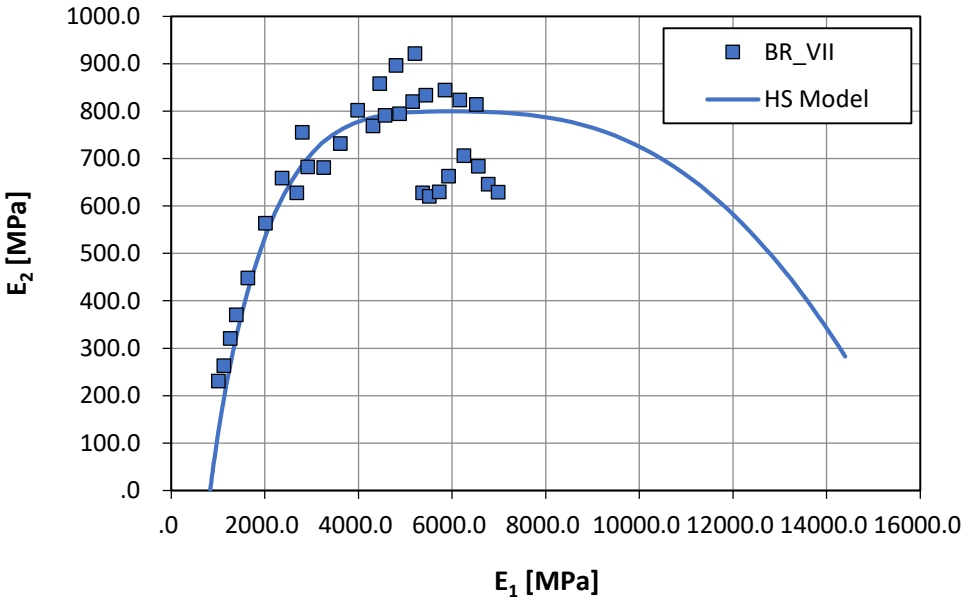

Figura 5.28 - Diagramma di Cole-Cole per il provino BR_VII

5.1.7.3 ***Provino FR VIII***

Codice	Processo	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_m [mm]	D [mm]
FR_VIII	Pre spianamento	116,3	116,5	116,8	117,2	116,7	93,95
	Post spianamento						

Tabella 5.21 - Dimensioni geometriche del provino FR_VIII

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	7029	6682	6419	6116	5839	5611	5318	5139
Phase angle [°]	6,56	6,95	7,28	7,82	8,07	8,23	7,68	8,56

20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	5145	4829	4554	4220	3904	3707	3440	3242
Phase angle [°]	8,04	8,75	9,09	9,6	10,05	10,33	10,68	10,94

35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	3631	3323	3052	2723	2443	2265	2039	1888
Phase angle [°]	10,84	10,5	12,13	12,67	13,07	13,36	13,72	13,86

50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	1629	1498	1381	1163	915,5	809,9	669,6	574,2
Phase angle [°]	15,87	14,39	14,17	15,16	15,91	16,11	15,2	15,43

Tabella 5.22 - Risultati prova modulo complesso provino FR_VIII

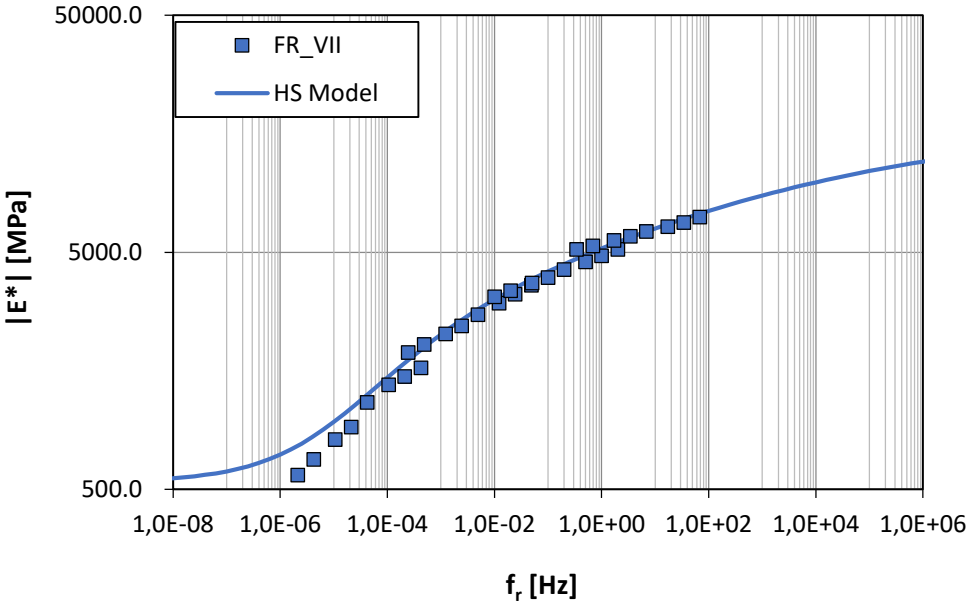

Figura 5.29 - Curva Maestra del Modulo Complesso del provino FR_VIII

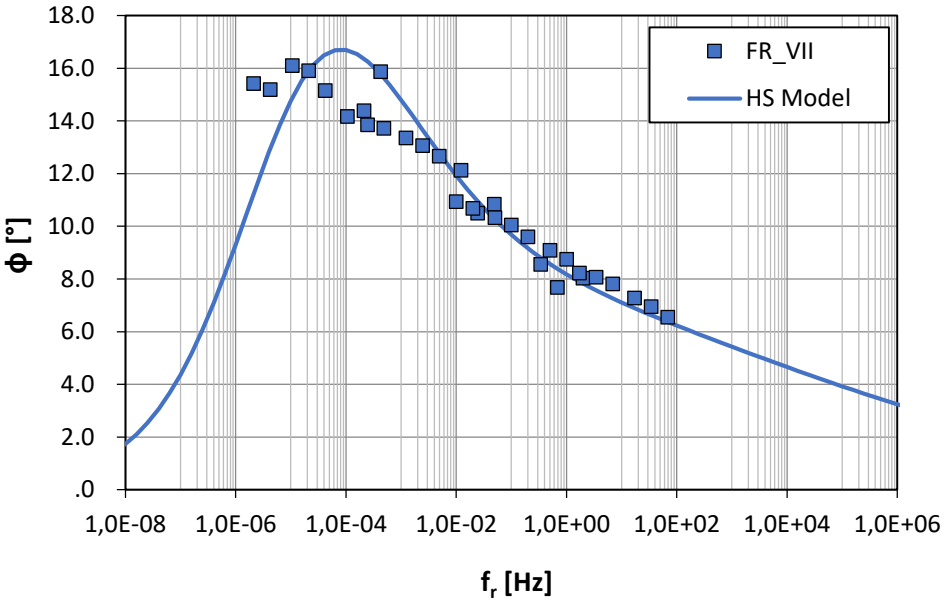

Figura 5.30 - Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino FR_VIII

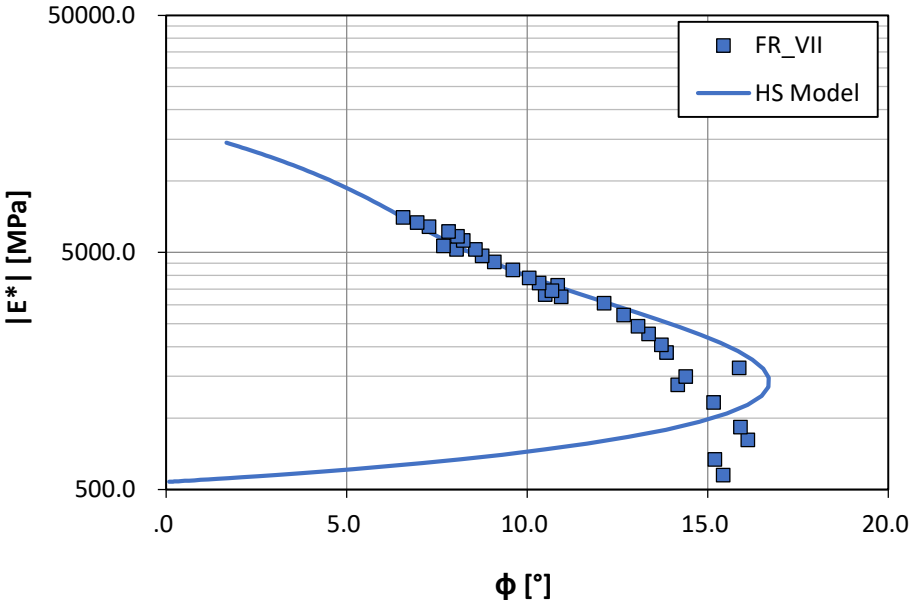

Figura 5.31 - Diagramma di Black del provino FR_VIII

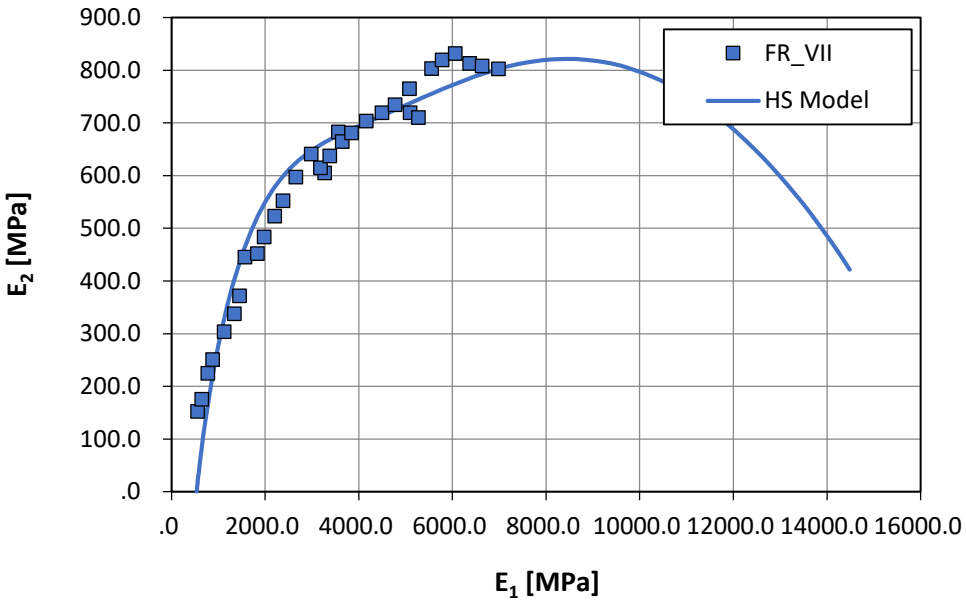

Figura 5.32 - Diagramma di Cole-Cole per il provino FR_VIII

5.1.7.4 ***Confronto delle Curve Maestre***

Di seguito vengono riportati i grafici di confronto delle varie curve maestre dei tre provini.

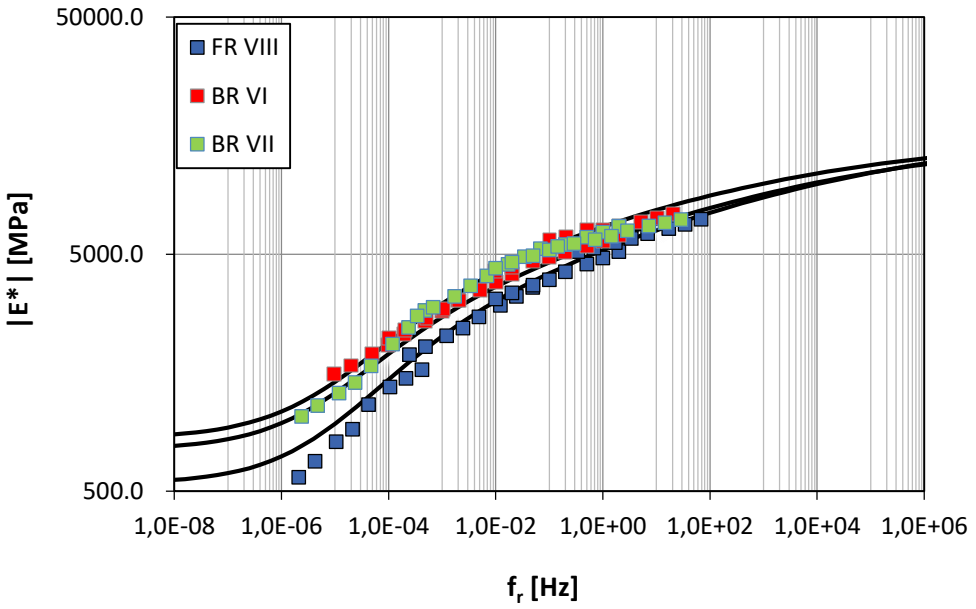

Figura 5.33 - Confronto Curve Maestre del Modulo Complesso dei tre provini della famiglia riferimento

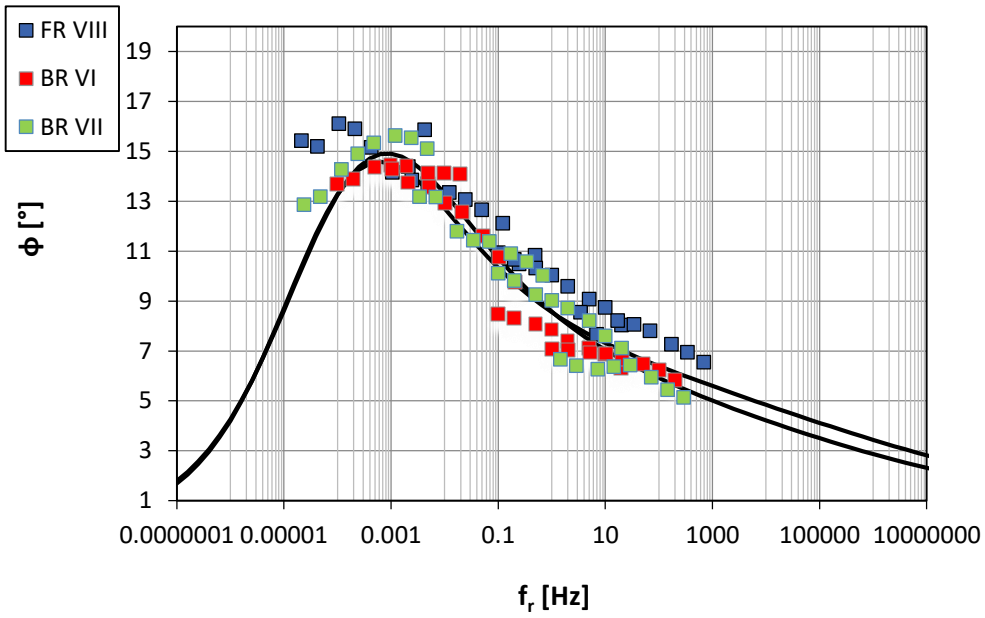

Figura 5.34 - Confronto Curve Maestre dell'Angolo di Fase dei tre provini della famiglia riferimento

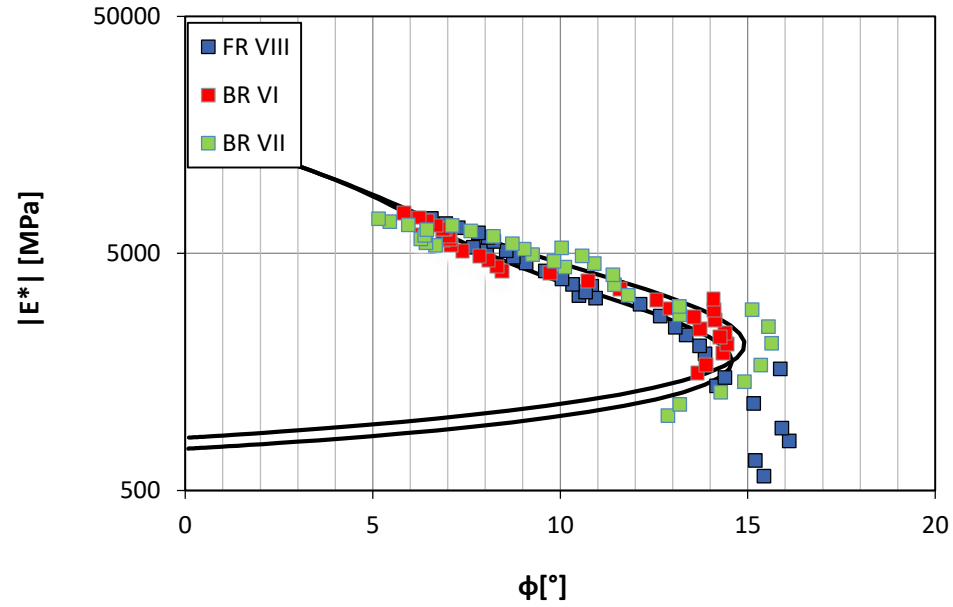

Figura 5.35 - Confronto diagrammi di Black dei tre provini della famiglia riferimento

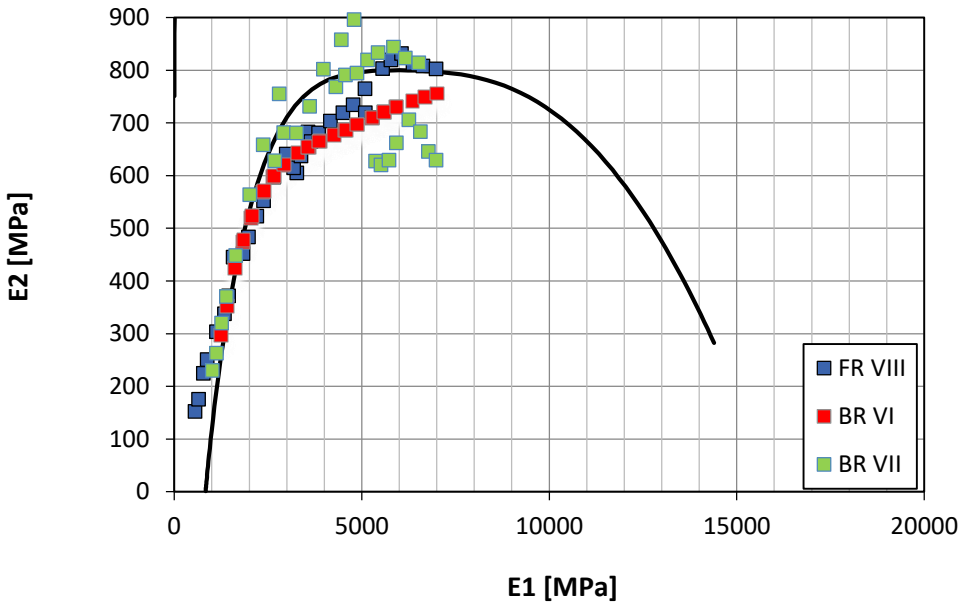

Figura 5.36 - Confronto diagrammi di Cole-Cole dei tre provini della famiglia riferimento

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 piccoli 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 rigidezza 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
- Le Prove di Fatica sono state eseguite su provini opportunamente carotati e tagliati ricavati dai seguenti provini grandi:

AF0,2_I; AF0,2_II; AF0,2_III; AF0,2_IV;CF0,2_VIII;CF_0,2_IX;CF_0,2_X

- Le Prove di Modulo Complesso a Compressione hanno riguardato i seguenti provini:

  BF0,2_V;BF0,2_VI;BF0,2_VII

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.

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

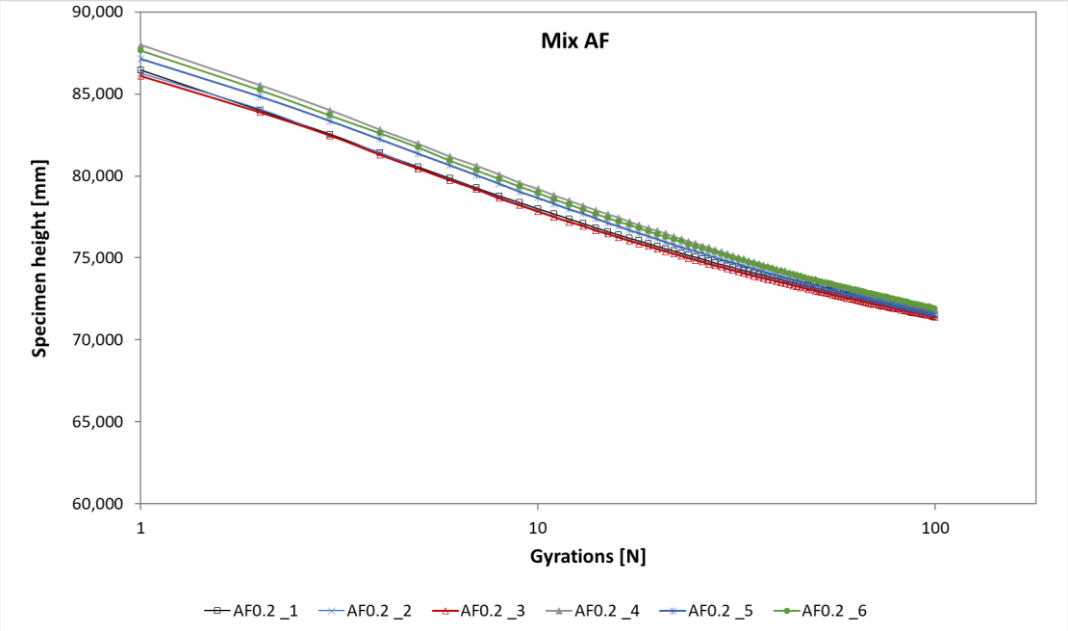

Figura 5.37 - Curve di compattazione provini dell'impasto AF0,2

	C_1 [mm]	k [/]
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 5.23 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto AF0,2

5.2.1.2 *Impasto BF0,2*

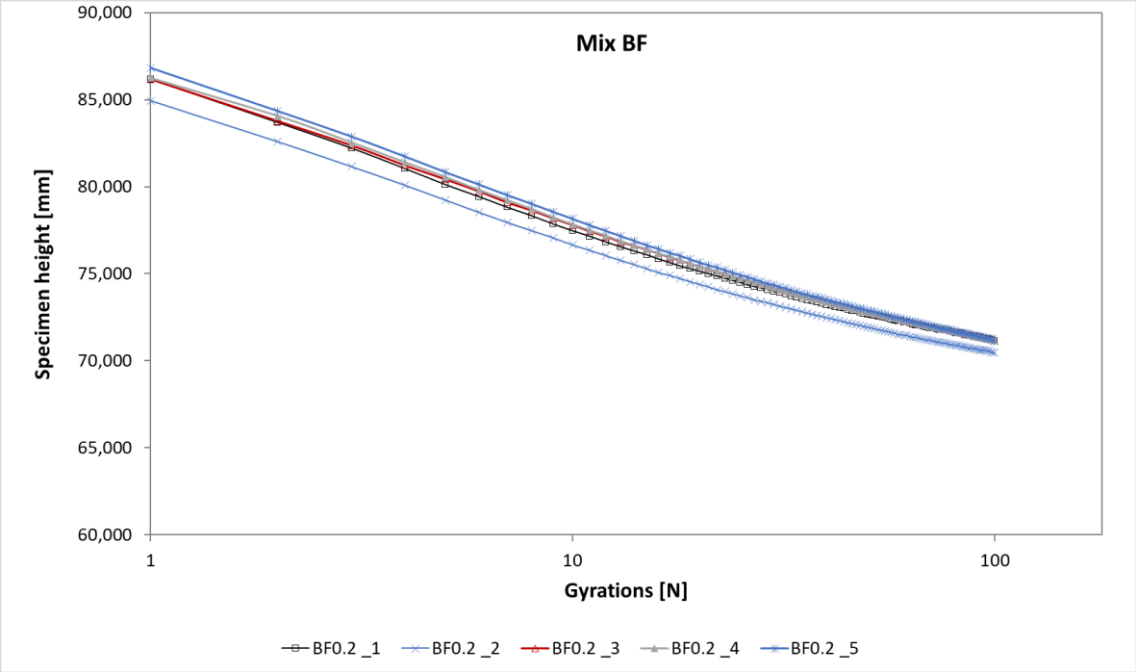

Figura 5.38 - Curve di compattazione provini dell'impasto BF0,2

	C_1 [mm]	k [/]
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 5.24 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto BF0,2

5.2.1.3 *Impasto CF0,2*

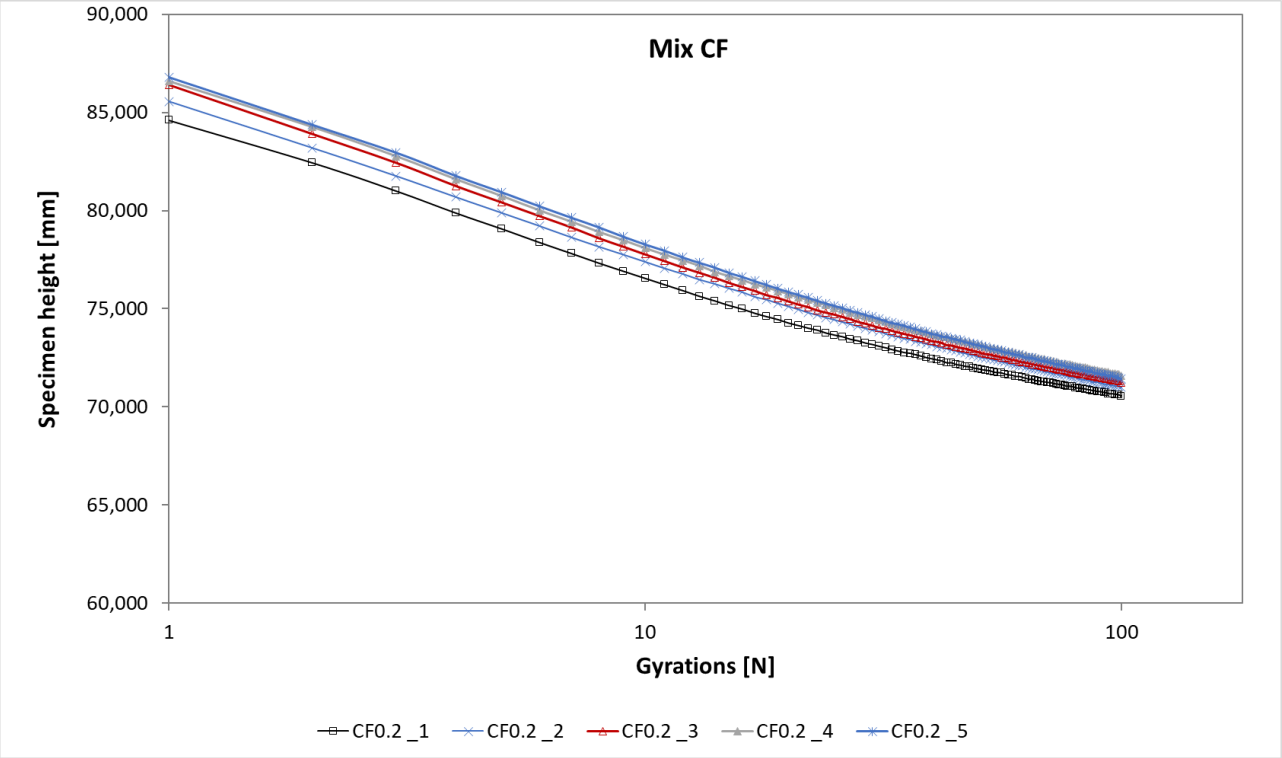

Figura 5.39 - Curve di compattazione provini dell'impasto CF0,2

	C_1 [mm]	k [/]
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 5.25 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto CF0,2

5.2.2 Perdita di acqua

5.2.2.1 Impasto AF0,2

Figura 5.40 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto AF0,2

5.2.2.2 Impasto BF0,2

Figura 5.41 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto BF0,2

5.2.2.3 Impasto CF0,2

Figura 5.42 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto CF0,2

5.2.3 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 ITSMm.

	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
Codice	$ITSM_1$ [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 5.26 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia fibre

Si nota come il valore dei moduli cresca nel tempo: ciò dipende all'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:

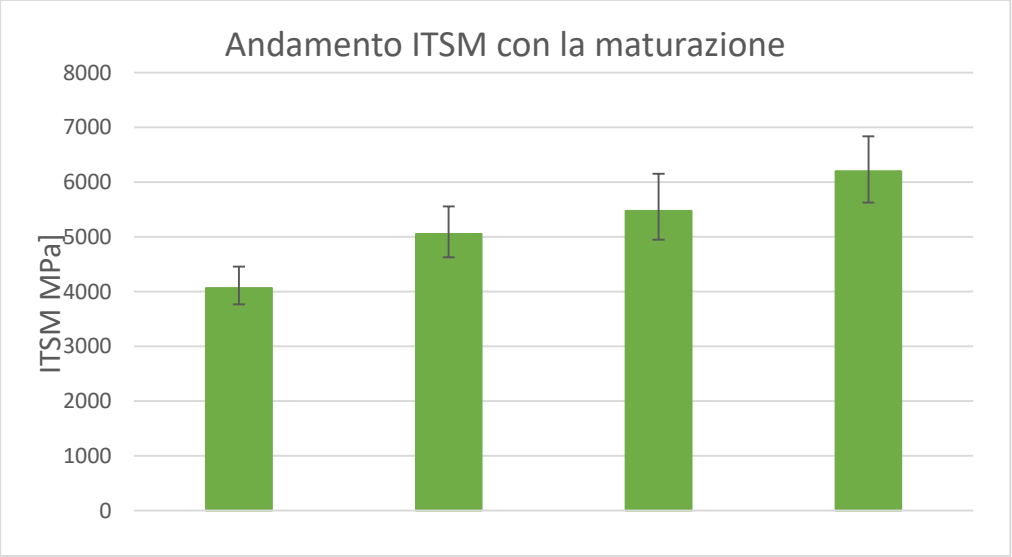

Figura 5.43 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia fibre

5.2.4 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
Codice	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 5.27 - Valori ITS nel tempo per la famiglia fibre

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

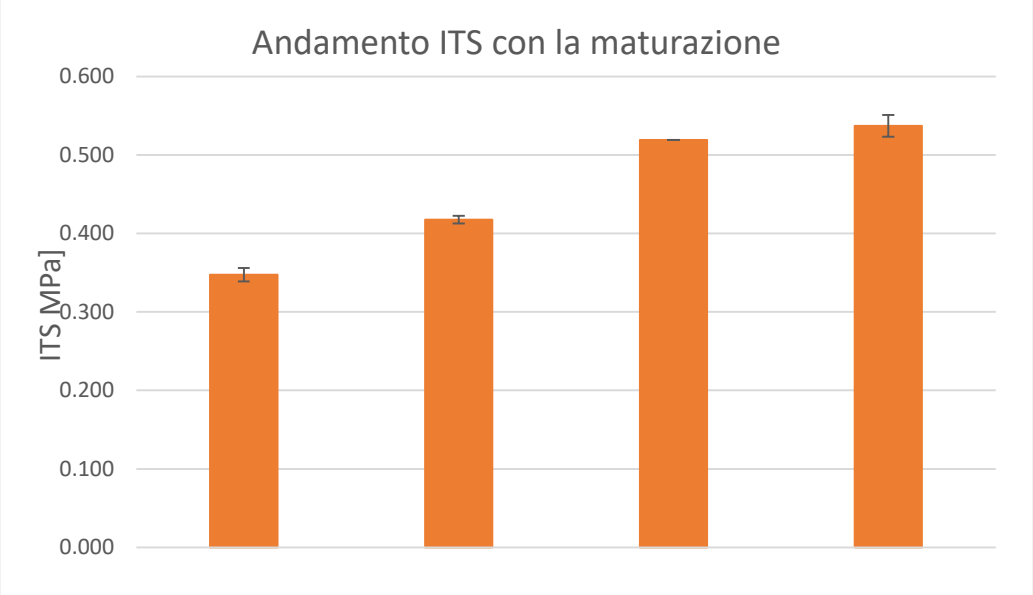

Figura 5.44 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia fibre

5.2.4.1 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 e l'area sottesa, che corrisponde all' energia totale. Inoltre si calcolano l'energia fino alla rottura (E1), e dopo la rottura (E2). Tutte queste energia 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.

5.2.4.1.1 ***Provini a 3 gg***

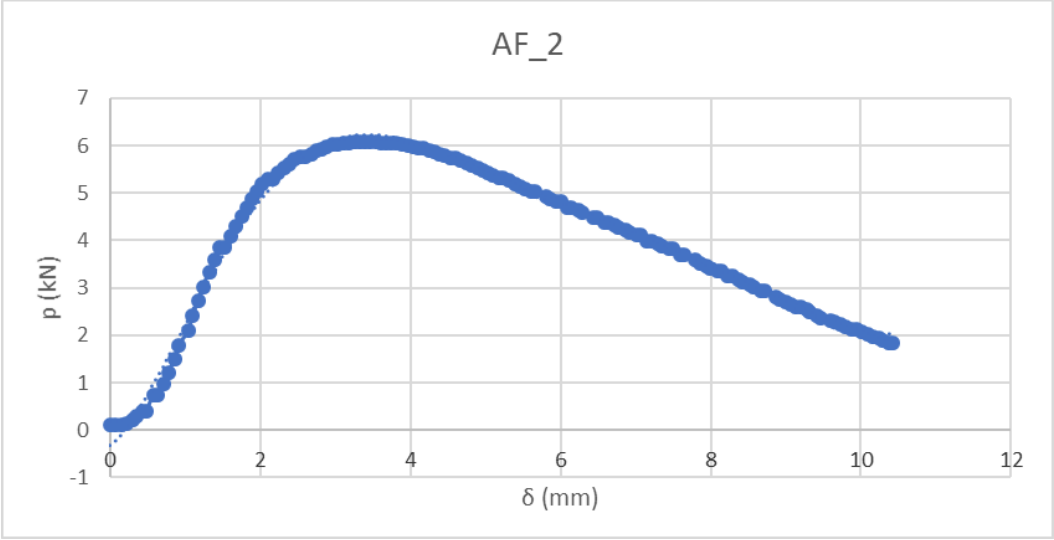

Figura 5.45 - Andamento ITSM, per il provino AF_2

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

Tabella 5.27 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino AF_2

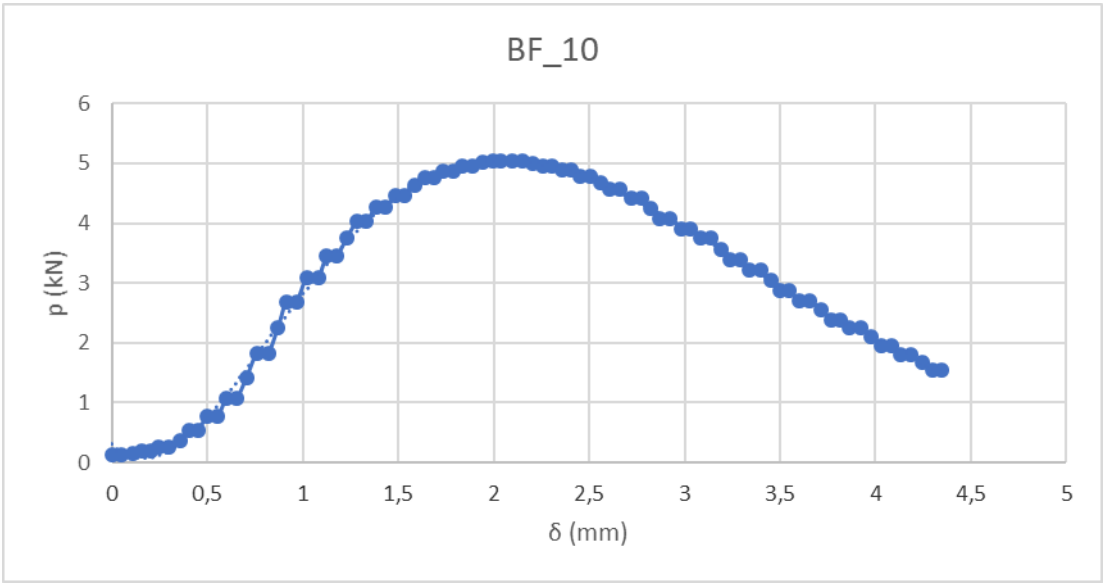

Figura 5.46 - Andamento ITSM, per il provino BF_10

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

Tabella 5.28 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino BF_10

5.2.4.1.2 ***Provini a 7 gg***

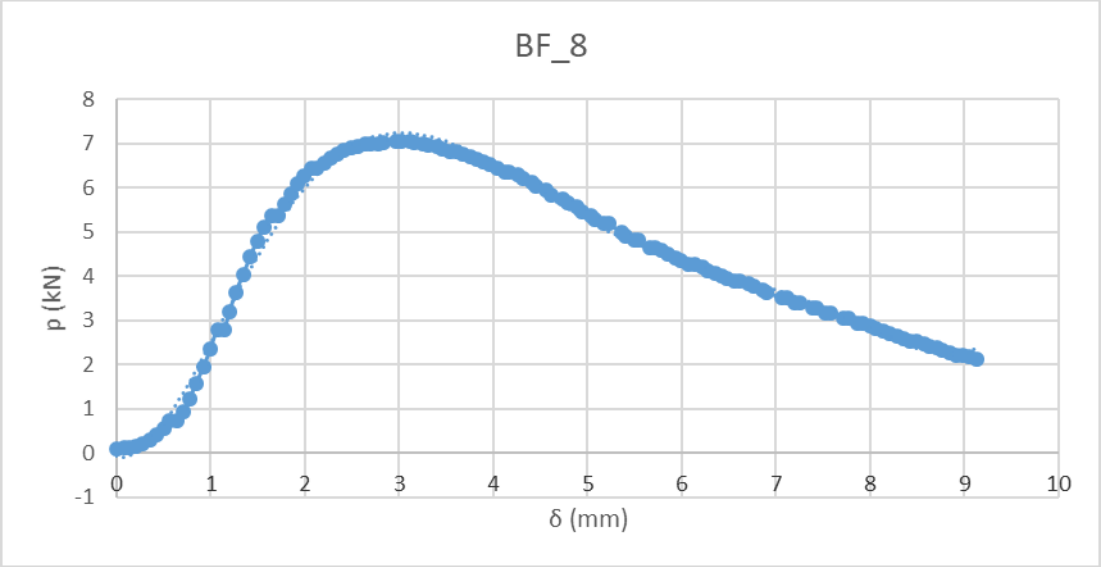

Figura 5.46 - Andamento ITSM, per il provino BF_8

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

Tabella 5.28 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino BF_8

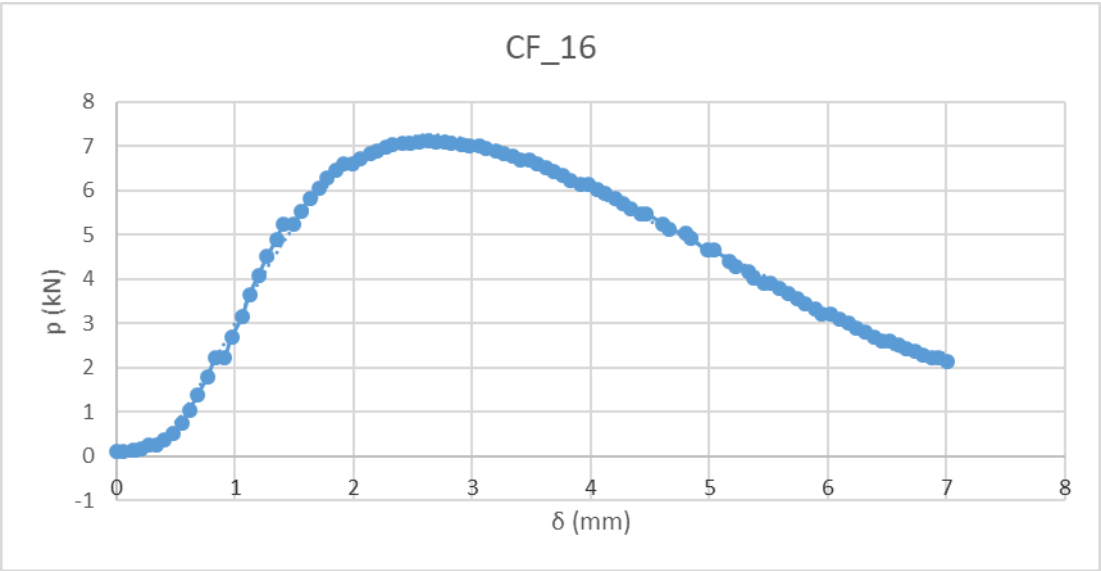

Figura 5.47 - Andamento ITSM, per il provino CF_16

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

Tabella 5.29 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino CF_16

5.2.4.1.3 ***Provini a 14 gg***

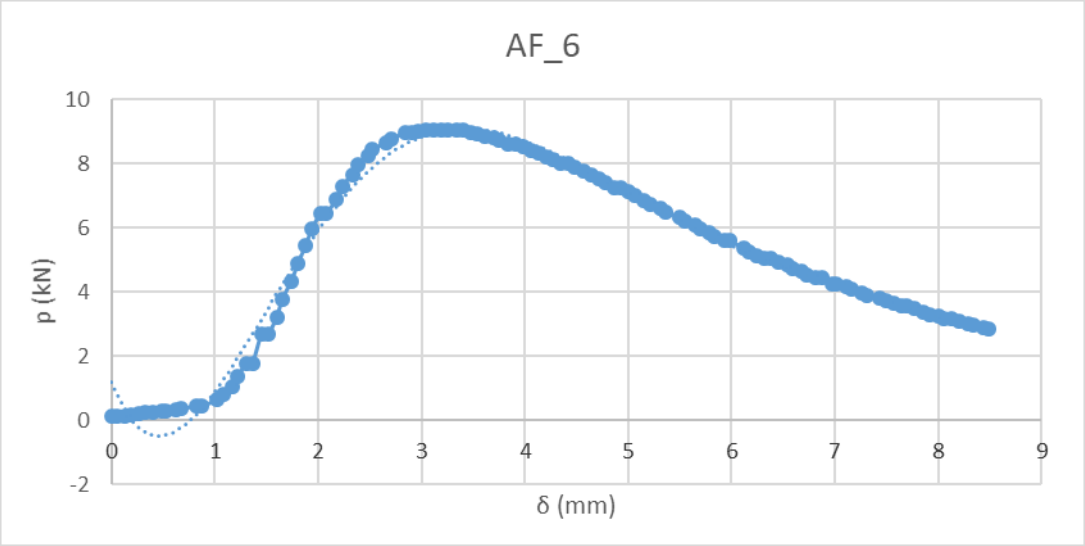

Figura 5.48 - Andamento ITSM, per il provino AF_6

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

Tabella 5.30 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino AF_6

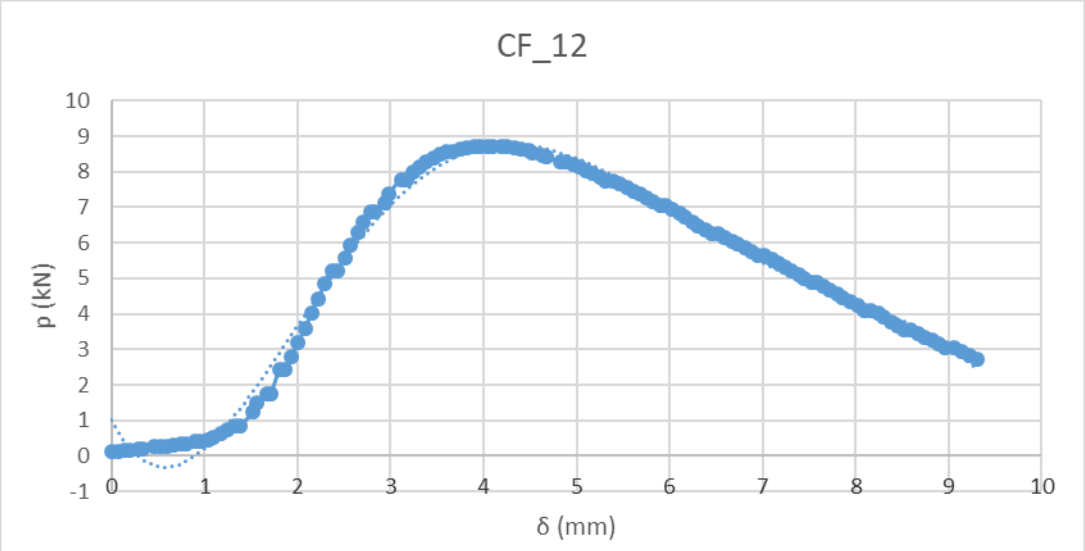

Figura 5.49 - Andamento ITSM, per il provino CF_12

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

Tabella 5.31 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino CF_12

5.2.4.1.4 ***Provini a 30 gg***

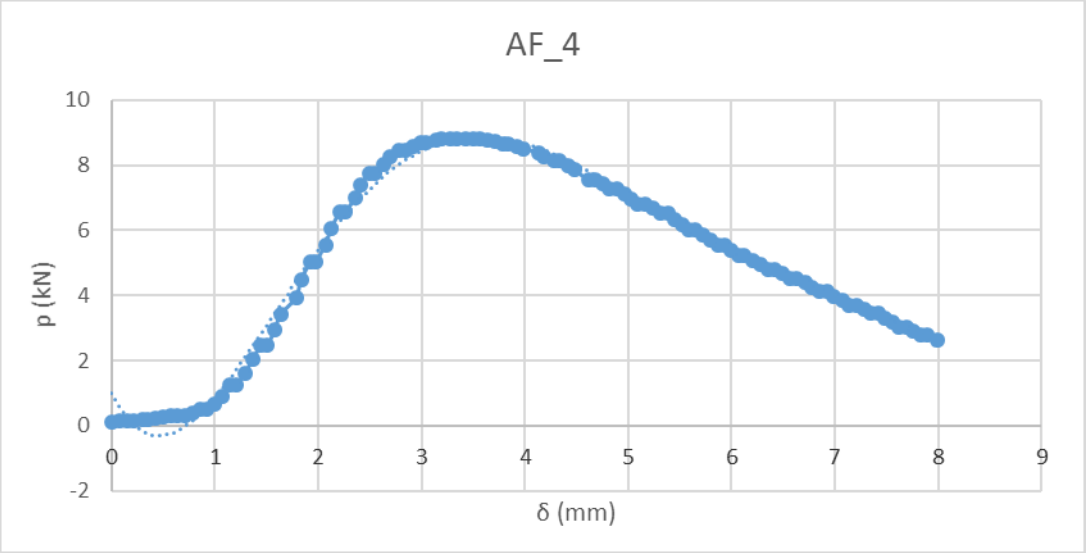

Figura 5.50 - Andamento ITSM, per il provino AF_4

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

Tabella 5.32 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino AF_4

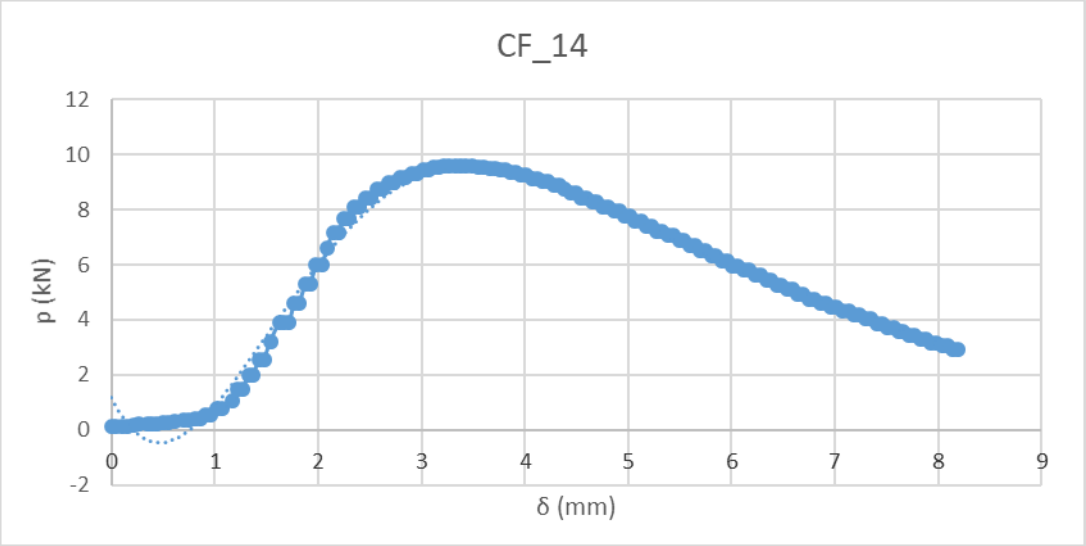

Figura 5.51 - Andamento ITSM, per il provino CF_14

CTI	E_{TOT}	E_1	E_2
4,53	46,01	14,61	31,40

Tabella 5.33 - Valori CTI e Energia nel tempo per il provino CF_14

5.2.5 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS

	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr
Codice	ε_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	[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 5.34 - 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, calcolato come:

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

I risultati sono stati anche graficati:

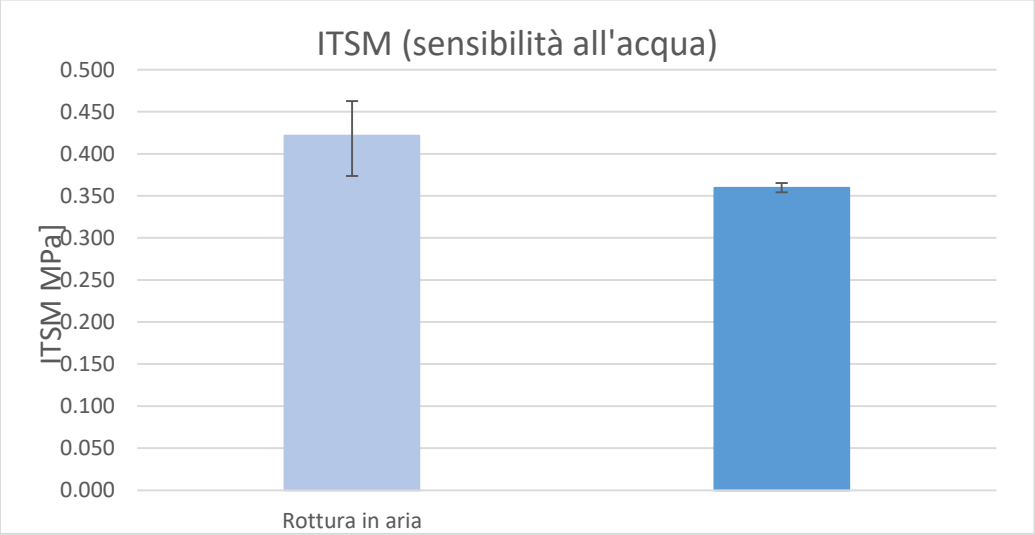

Figura 5.52 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia fibre

5.2.6 Prove di Fatica

I provini sono stati sottoposti a prove ITSM preliminari per determinare il modulo di rigidezza in trazione indiretta. In base a questi risultati sono stati stimati i valori della tensione imposta iniziale σ_effettivo da inserire nel software ITFT. Dopo i primi 115 cicli, il software fornisce il valore della deformazione iniziale ε_0, utile a determinare le curve di fatica di seguito riportate.

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{effettivo}$ [MPa]	ε_0	n° cicli
AF0.2_I sup	56,4	94,2	5075	300	195	392500
AF0.2_I inf	52,1	94	6413	450	251	16100
AF0.2_II sup	58,9	94,6	5352	275	181	29000
AF0.2_II inf	56,7	94,1	5846	375	220	44000
AF0.2_III sup	58,2	94,3	4980	350	939	1565
AF0.2_III inf	56,3	94	5464	250	199	554000
AF0.2_IV sup	59,1	94,3	5498	300	356	15000
AF0.2_IV inf	63,1	94,5	6200	500	1421	720
CF0.2_VIII sup	61,0	94,4	4531	250	241	21000
CF0.2_VIII inf	60,3	94,1	5927	400	294	14220
CF0.2_IX sup	60,7	94,2	4940	325	927	3000
CF0.2_IX inf	62,6	94	5803	450	1231	850
CF0.2_X sup	58,7	94,5	5291	300	343	3500
CF0.2_X inf	54,8	93,8	6077	475	1634	500

Tabella 5.35 - Risultati prove di fatica famiglia fibre

I valori riportati in rosso sono stati scartati per varie problematiche

Sono state inoltre riportate le curve di fatica in scala bilogaritmica.

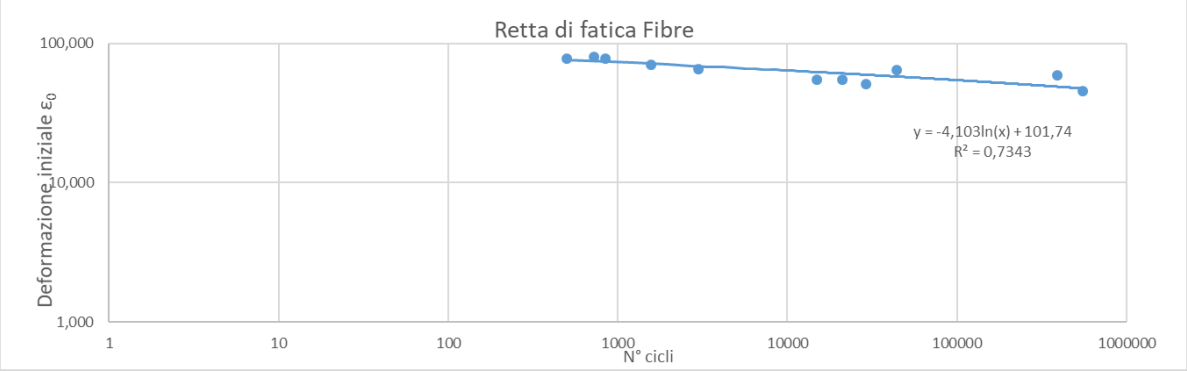

Figura 5.53 - Retta di fatica (N° cicli; ε_0) fibre

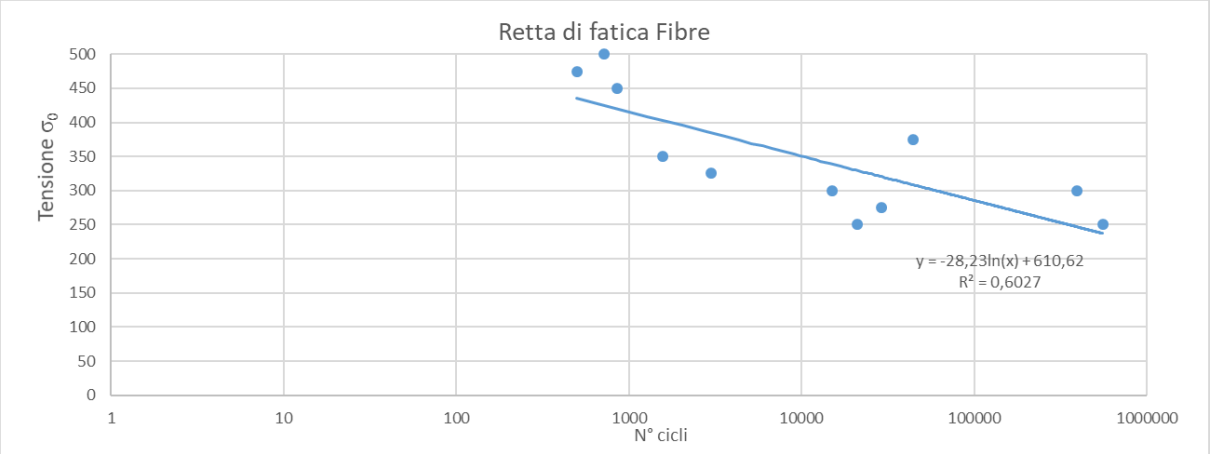

Figura 5.54 - Retta di fatica (N° cicli; σ_0) fibre

5.2.7 Prove di Modulo Complesso a Compressione e Curve Maestre

Le prove sono state eseguite su tre provini utilizzando il macchinario UTM-30. I risultati sono stati riportati di seguito, suddivisi per singolo provino, nel seguente ordine:

- Dimensioni geometriche
- Risultati prove di modulo complesso a compressione, basati sulle dimensioni geometriche post spianamento
- Curve Maestre

5.2.7.1 Provino BF0,2 V

Codice	Processo	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_m [mm]	D [mm]
BF0,2_V	Pre-spianamento	119,8	119,6	120,4	121,7	120,4	94,6
	Post-spianamento					129,1	

Tabella 5.36. - Dimensioni geometriche del provino BF0,2_V

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	4438	4208	4025	3808	3649	3516	3345	3221
Phase angle [°]	6,49	6,67	6,98	7,23	7,48	7,61	7,82	8,02

20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	3200	2985	2811	2597	2447	2346	2167	2045
Phase angle [°]	8,33	8,44	8,8	9,32	9,76	10,15	10,61	10,44

35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	2178	1993	1833	1646	1509	1402	1264	1170
Phase angle [°]	10,47	11,03	11,6	12,2	12,62	12,86	13,17	13,46

50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	1503	1348	1224	1078	982,3	905,6	813,5	754,9
Phase angle [°]	12,76	13,11	13,33	13,6	13,58	13,45	13,36	12,97

Tabella 5.37 - Risultati prova modulo complesso provino BF0,2_V

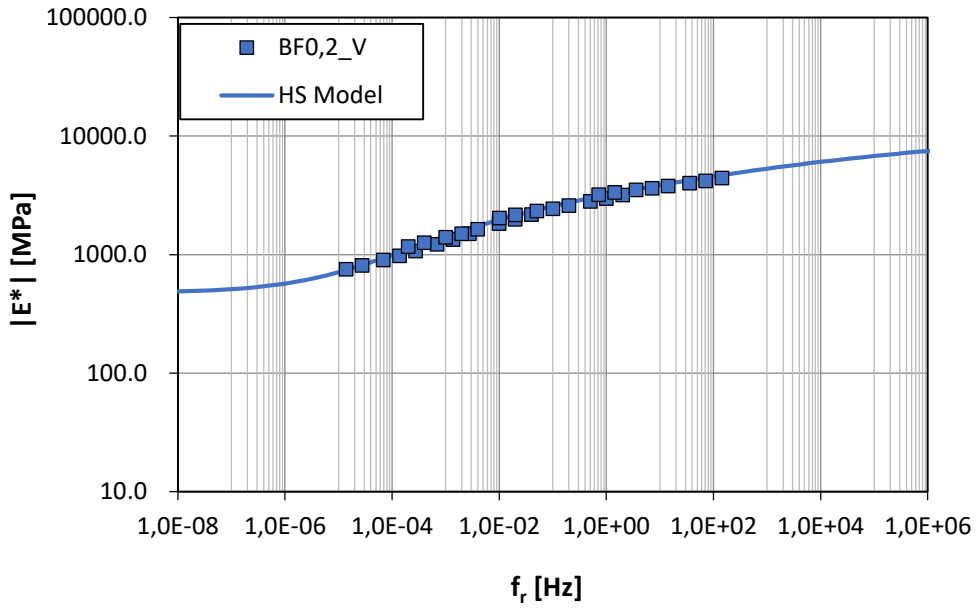

Figura 5.55 - Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BF0,2_V

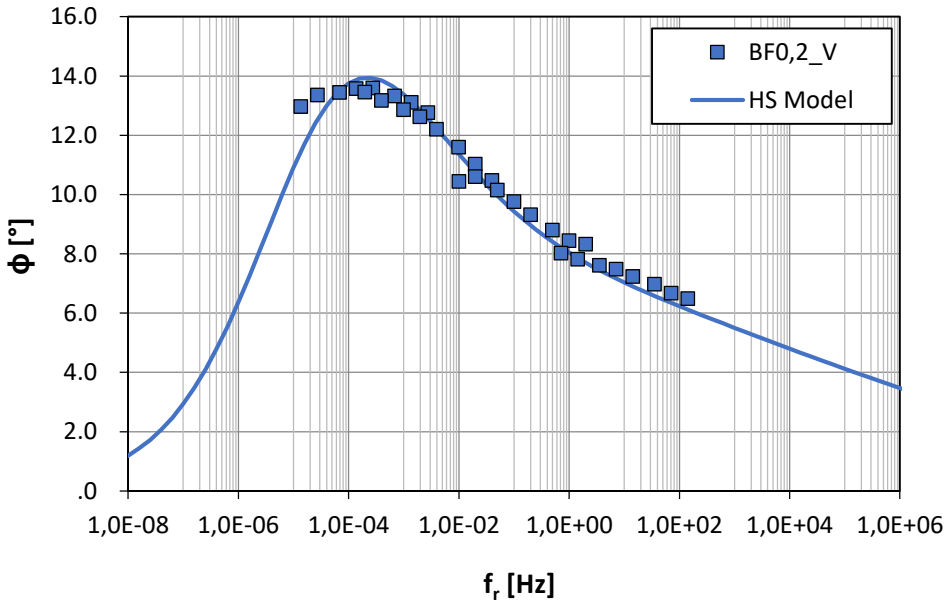

Figura 5.56 - Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BF0,2_V

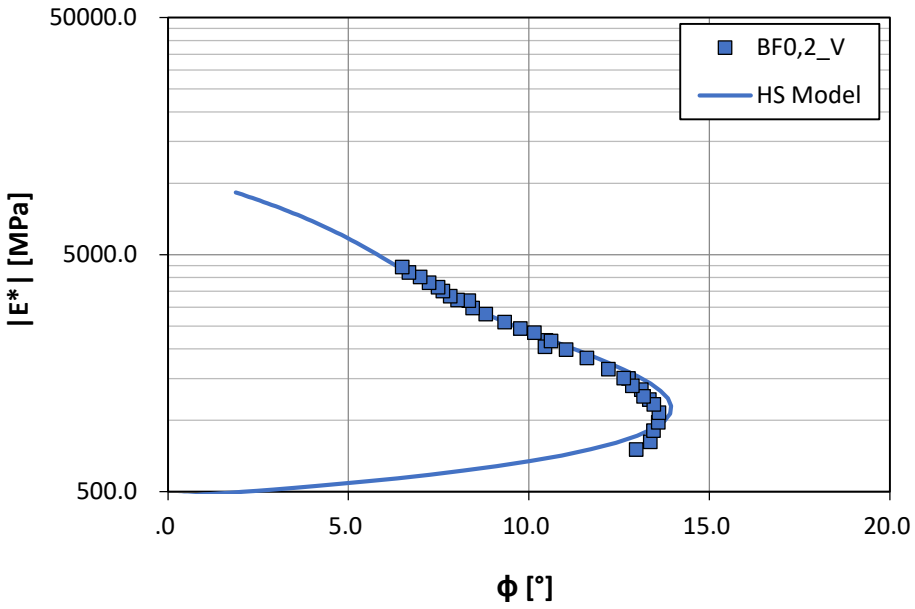

Figura 5.5711 - Diagramma di Black del provino BF0,2_V

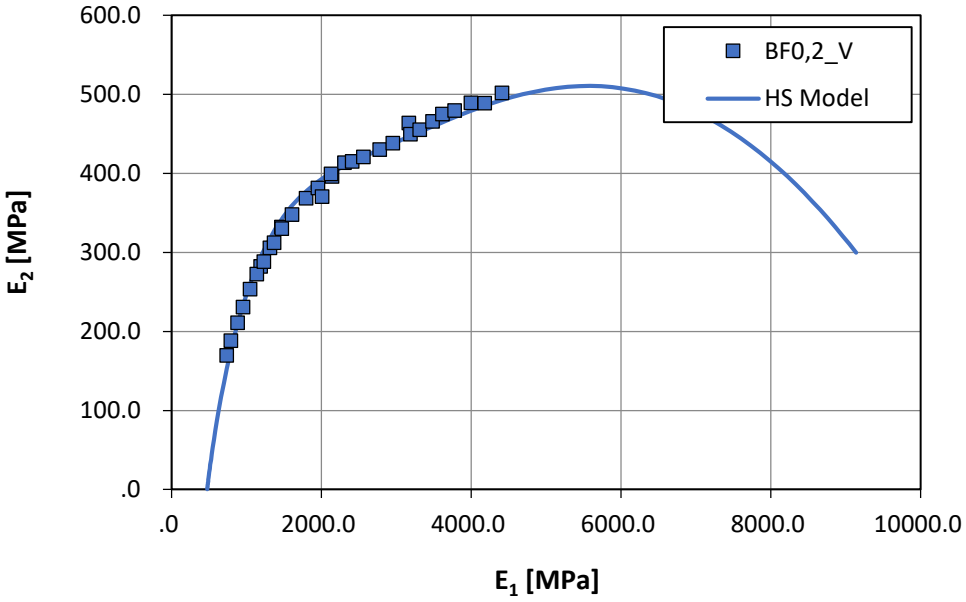

Figura 5.58 - Diagramma di Cole-Cole per il provino BF0,2_V

5.2.7.2 ***Provino BF0,2 VI***

Codice	Processo	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_m [mm]	D [mm]
BF0,2_VI	Pre-spianamento	124,5	124,9	125,1	125,2	124,9	94,3
	Post-spianamento					128,5	

Tabella 5.38 - Dimensioni geometriche del provino BF0,2_VI

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	5768	5477	5234	4954	4742	4566	4331	4153
Phase angle [°]	6,28	7,27	7,15	7,47	7,81	7,81	8,21	8,34

20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	4233	3965	3747	3476	3264	3098	2875	2718
Phase angle [°]	7,68	8,47	8,87	9,53	9,87	10,18	10,62	10,93

35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	2846	2621	2414	2169	1989	1839	1661	1527
Phase angle [°]	10,65	11,28	11,93	12,46	12,89	13,09	13,28	13,36

50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	1967	1774	1611	1426	1297	1195	1073	990,3
Phase angle [°]	13,13	13,4	13,65	13,83	13,96	13,98	13,71	13,57

Tabella 5.39 - Risultati prova modulo complesso provino BR_VII

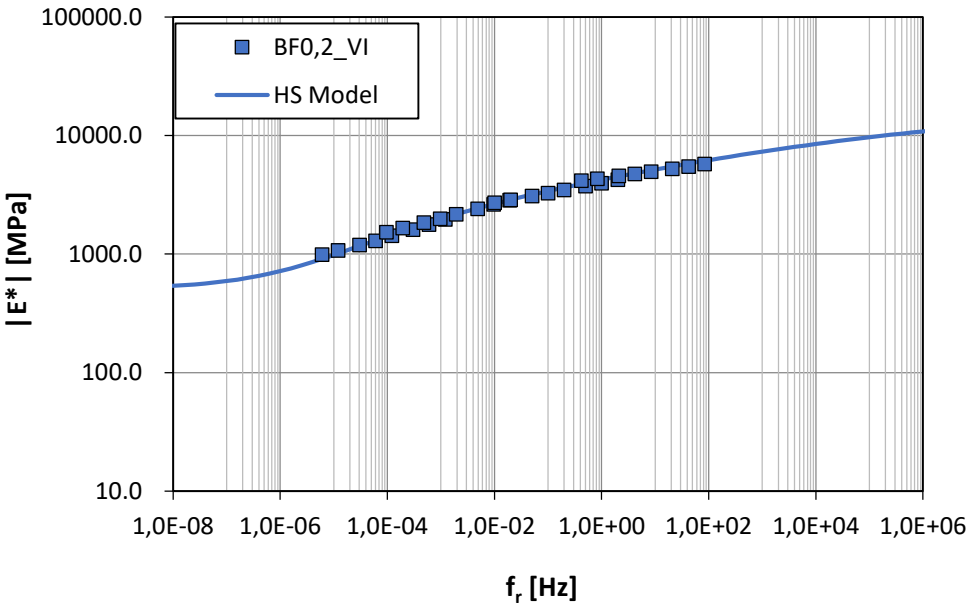

Figura 5.59 - Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BF0,2_VI

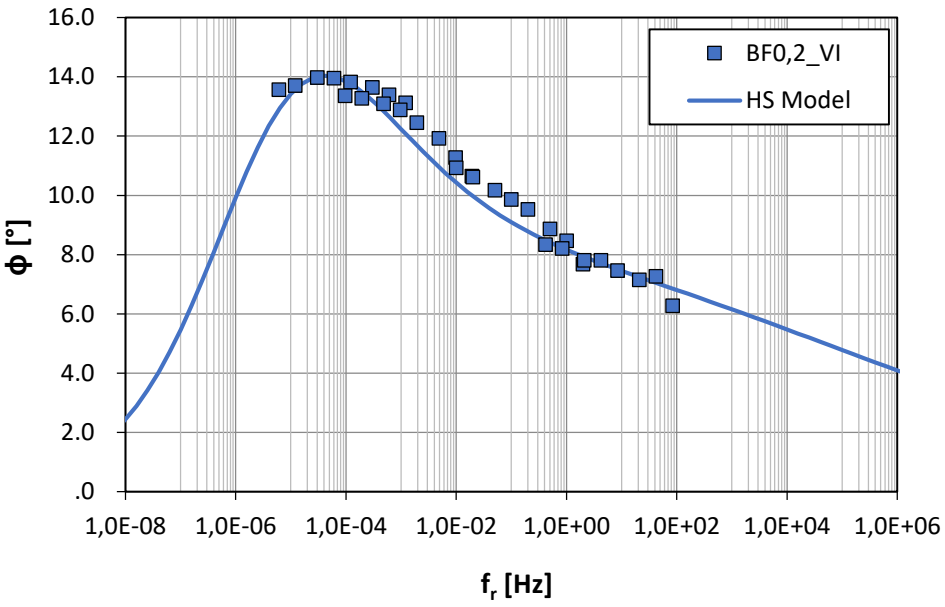

Figura 5.6012 - Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BF0,2_VI

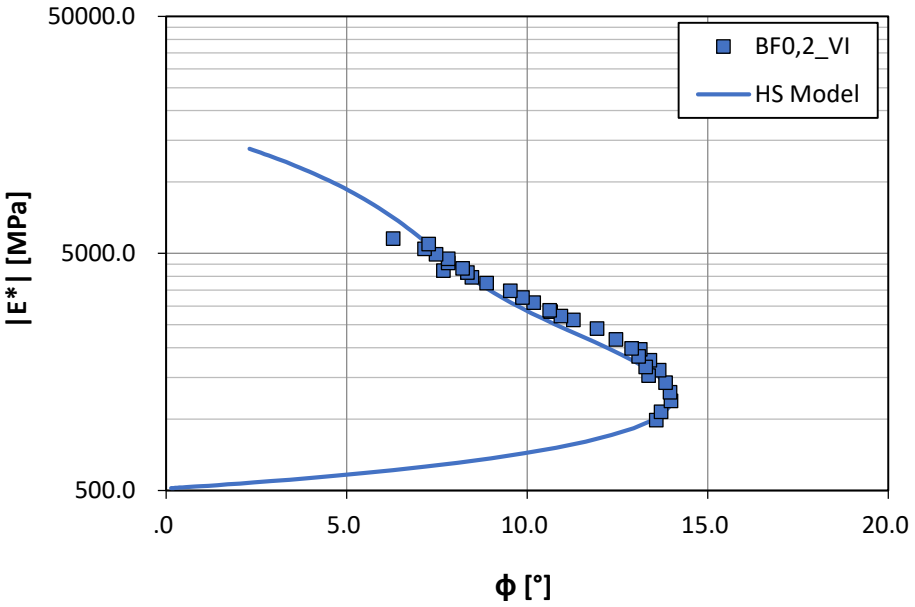

Figura 5.61 - Diagramma di Black del provino BF0,2_VI

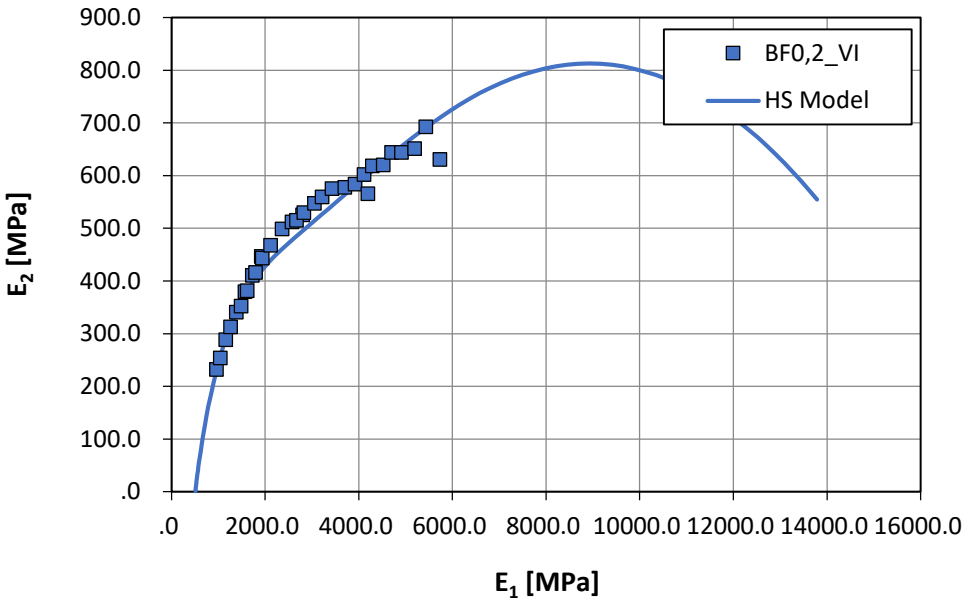

Figura 5.62 - Diagramma di Cole-Cole per il provino BF0,2_VI

5.2.7.3 ***Provino BF0,2_VII***

Codice	Processo	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	h_m [mm]	D [mm]
BF0,2_VII	Pre-spianamento	124,3	123,5	123,3	123,5	123,7	94,8
	Post-spianamento					128,1	

Tabella 5.40 - Dimensioni geometriche del provino BF0,2_VII

5 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	5883	5497	5166	4828	4594	4389	4155	3980
Phase angle [°]	5,67	6,38	6,95	7,57	8,07	8,23	8,44	8,72

20 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	3919	3581	3335	3083	2878	2704	2493	2324
Phase angle [°]	8,01	8,18	8,84	9,6	10,29	10,59	11,05	11,14

35 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	2024	1838	1640	1483	1330	1232	1109	1021
Phase angle [°]	11,93	11,97	12,37	12,84	13,07	13,09	13,1	13,1

50 °C								
f [Hz]	20 Hz	10 Hz	5 Hz	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus [Mpa]	1365	1214	1079	934,4	827,6	734,6	609,7	527,3
Phase angle [°]	14,46	14,2	14,39	14,31	14,74	14,76	14,26	14

Tabella 5.41 - Risultati prova modulo complesso provino BF0,2_VII

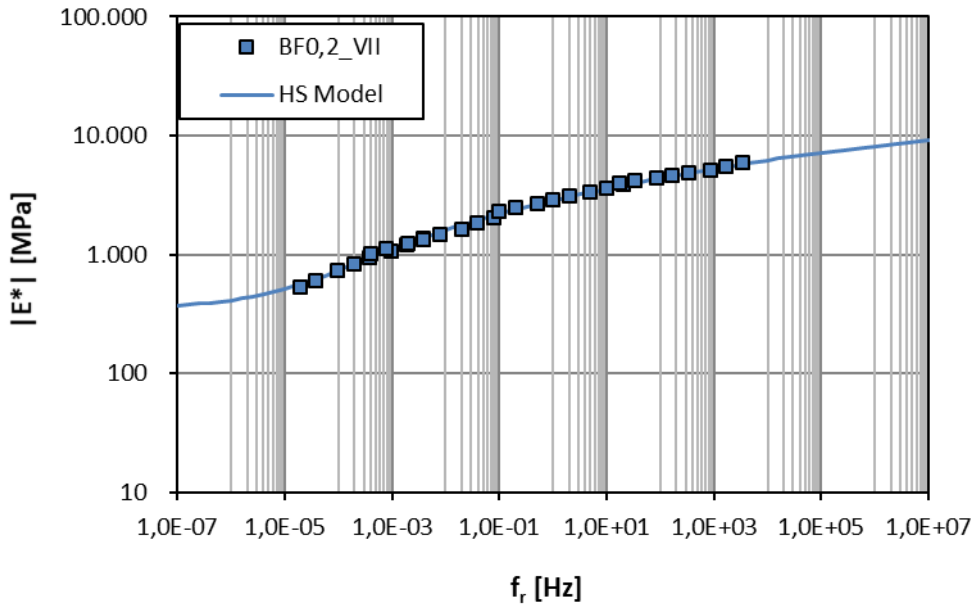

Figura 5.63 - Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BF0,2_VII

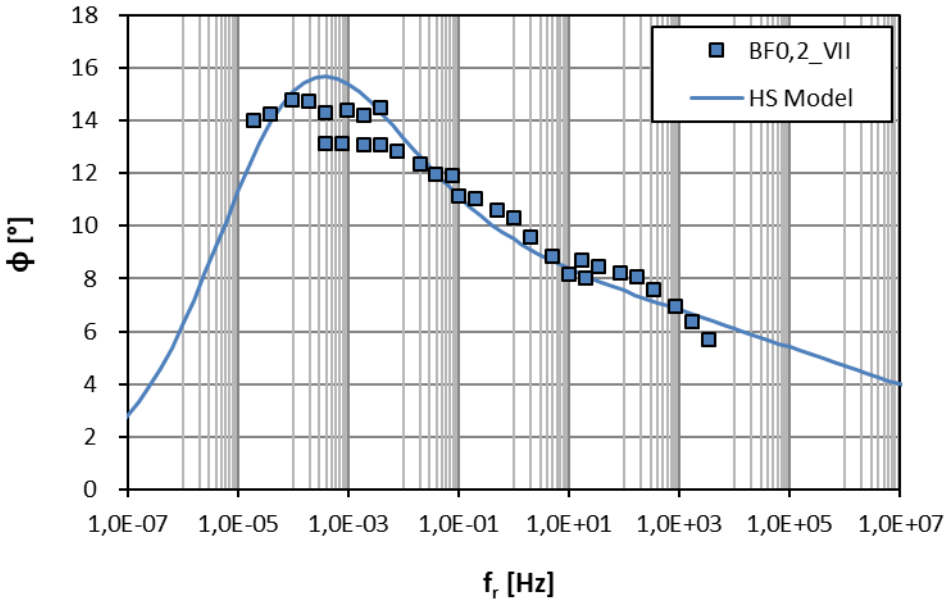

Figura 5.64 - Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BF0,2_VII

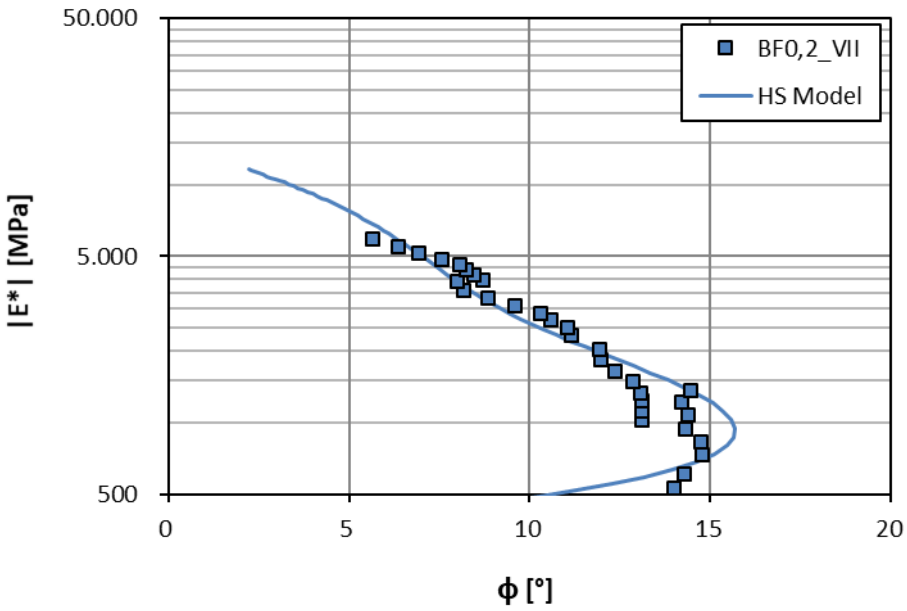

Figura 5.65 - Diagramma di Black del provino BF0,2_VII

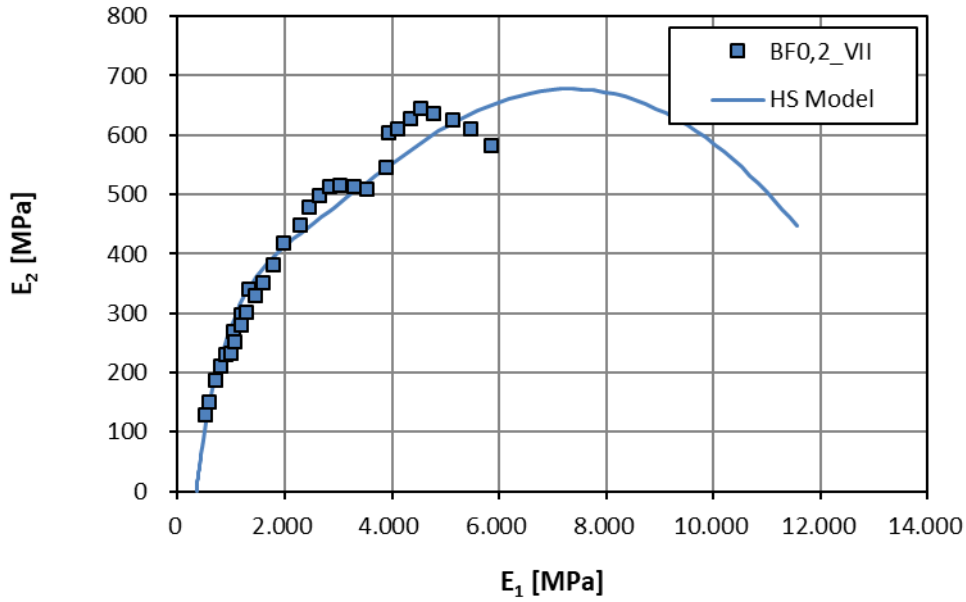

Figura 5.66 - Diagramma di Cole-Cole per il provino BF0,2_VII

5.2.7.4 Confronto delle Curve Maestre

Di seguito vengono riportati i grafici di confronto delle varie curve maestre dei tre provini.

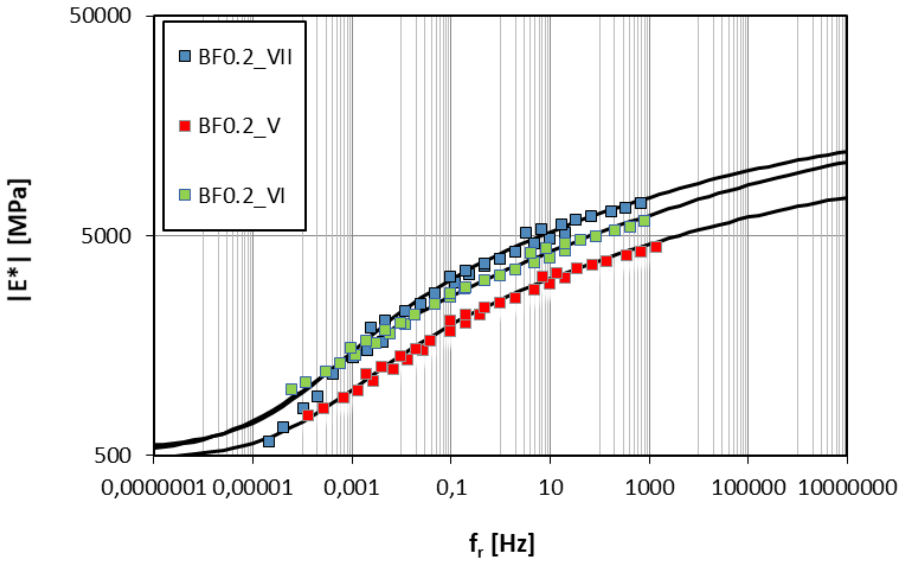

Figura 5.67 - Confronto Curve Maestre del Modulo Complesso dei tre provini della famiglia fibre

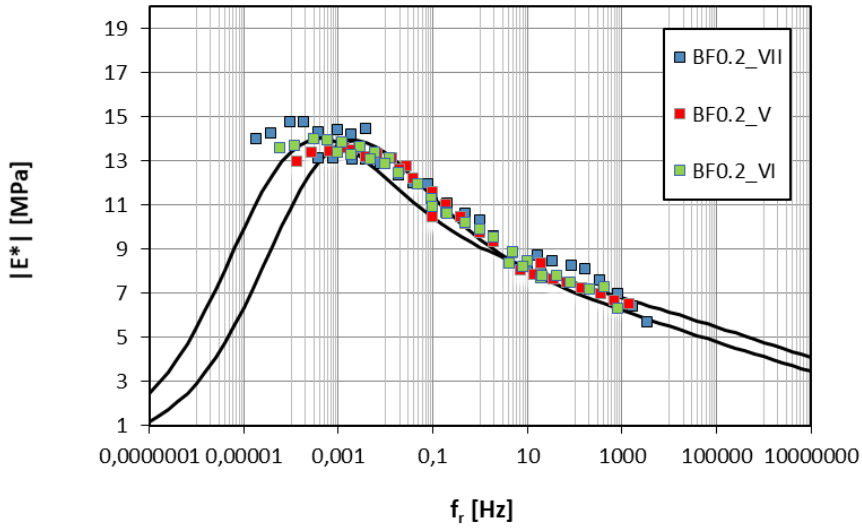

Figura 5.68 - Confronto Curve Maestre dell'Angolo di Fase dei tre provini della famiglia fibre

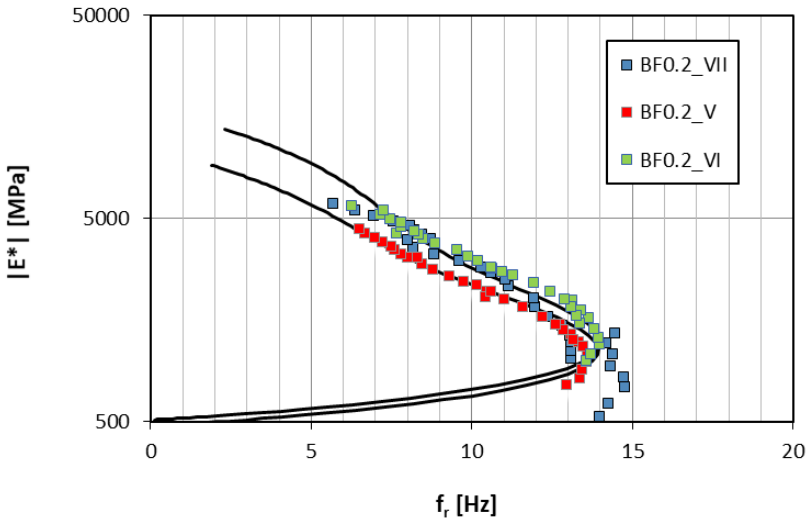

Figura 5.69 - Confronto diagrammi di Black dei tre provini della famiglia fibre

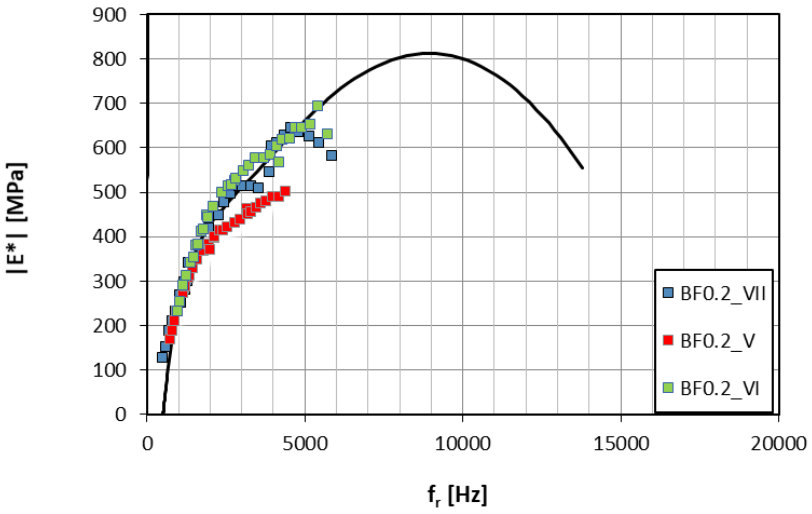

Figura 5.70 - Confronto diagrammi di Cole-Cole dei tre provini della famiglia fibre

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	C1 [%]	k [/]
media	50,27	2,05

Tabella 5.42 - Riepilogo parametri di lavorabilità riferimento

Fibre	C1 [%]	k [/]
media	36,39	2,23

Tabella 5.43 - 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 Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)

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

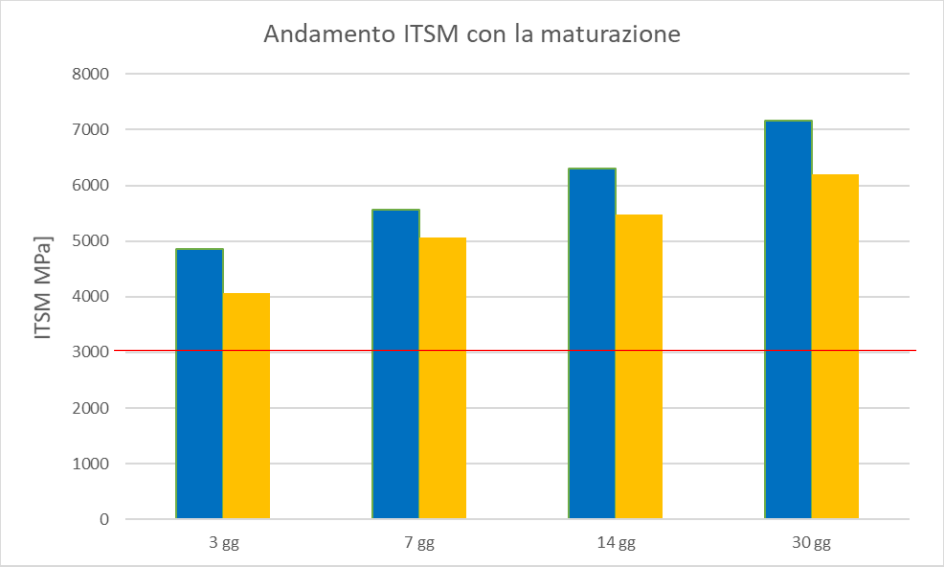

Figura 5.71 - Riepilogo e confronto valori ITSM

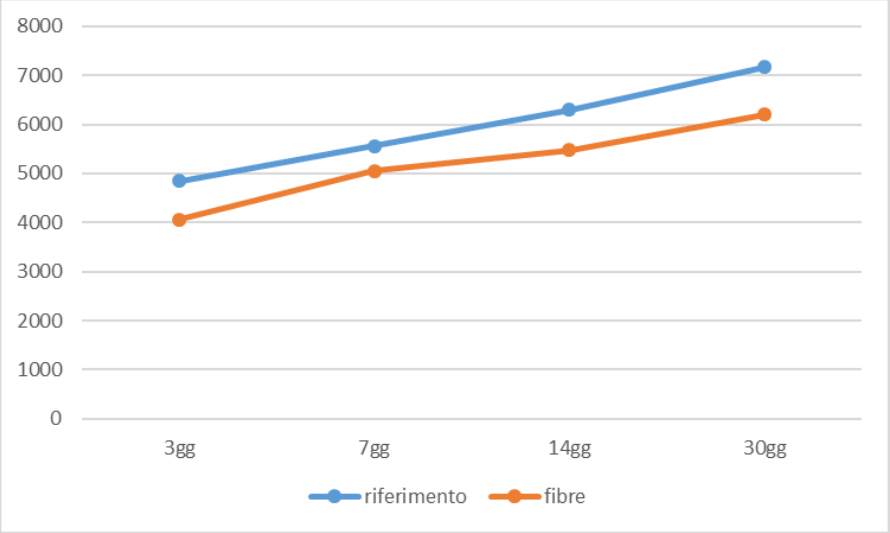

Figura 5.72 - Andamento valori ITSM nel tempo

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.

Inoltre, in Figura 5.72, è possibile notare anche che l'andamento del modulo per ogni famiglia, tende ad un asintoto orizzontale dopo 30 giorni. Questo indica che il materiale ha

perso la quasi totalità dell'acqua, e le sue caratteristiche in termini di rigidezza dopo 30 giorni si mantengono costanti.

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

5.3.3 Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

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

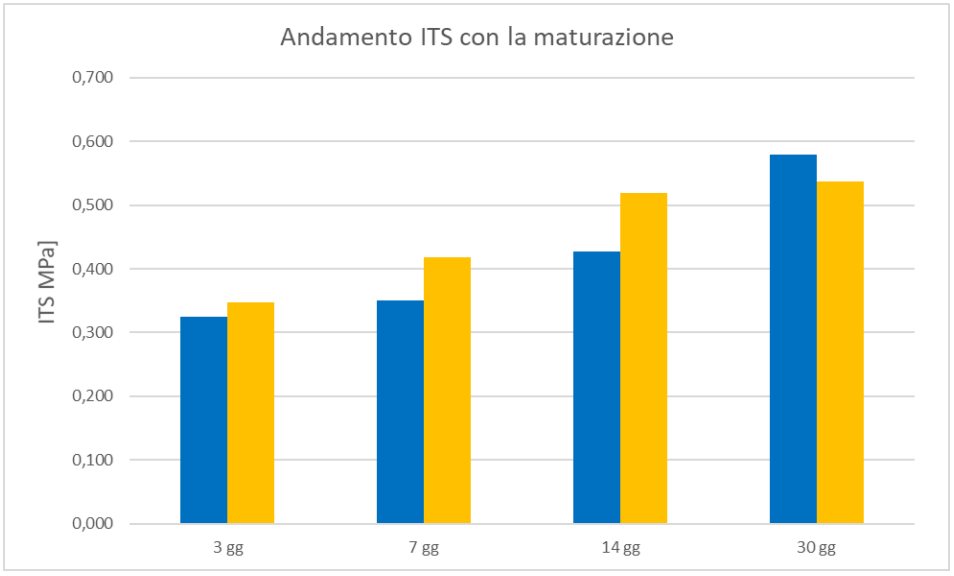

Figura 5.73 - Riepilogo e confronto valori ITS

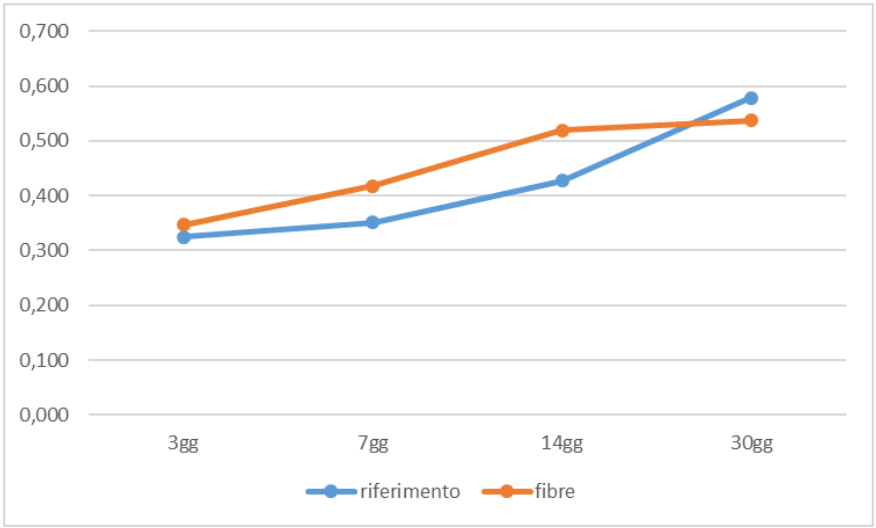

Figura 5.74 - Andamento ITS nel tempo

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 è che quella con le fibre arriva prima all' asintoto, questo perché le fibre assorbono più velocemente l'acqua.

5.3.4 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 5.44 – Riepilogo CTI ed energie

5.3.5 Sensibilità all'acqua

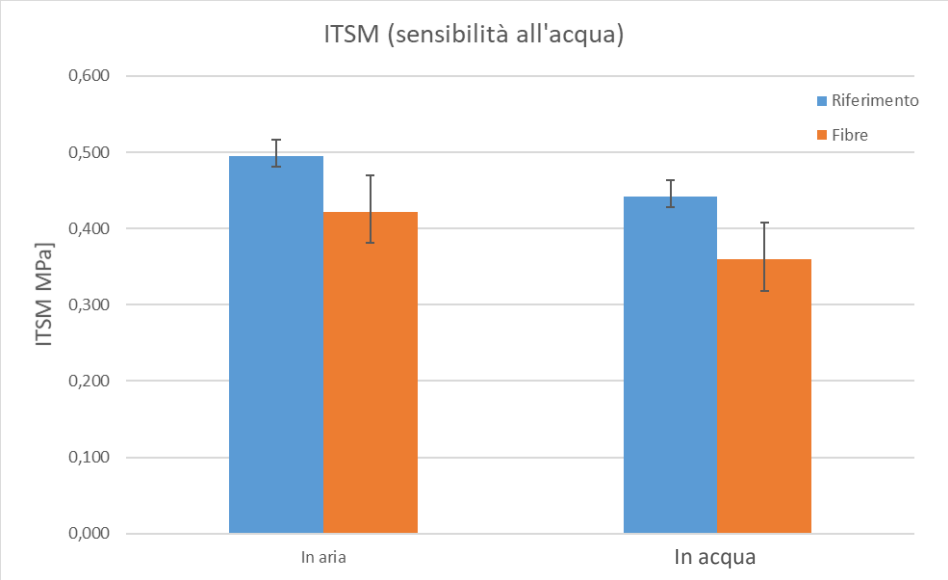

Tabella 5.45 - Confronto ITS per Sensibilità all'acqua delle due famiglie

Vengono inoltre riportati i valori dell'ITS ratio.

RIFERIMENTO	ITSr [MPa]
	0,89

Tabella 5.8 - Riepilogo ITS ratio riferimento

FIBRE	ITSr [MPa]
	0,85

Tabella 5.9 - 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. Inoltre vediamo come la soluzione senza fibre risulti più sensibile all' acqua rispetto a quella con le fibre.

5.3.6 *Prove di Fatica*

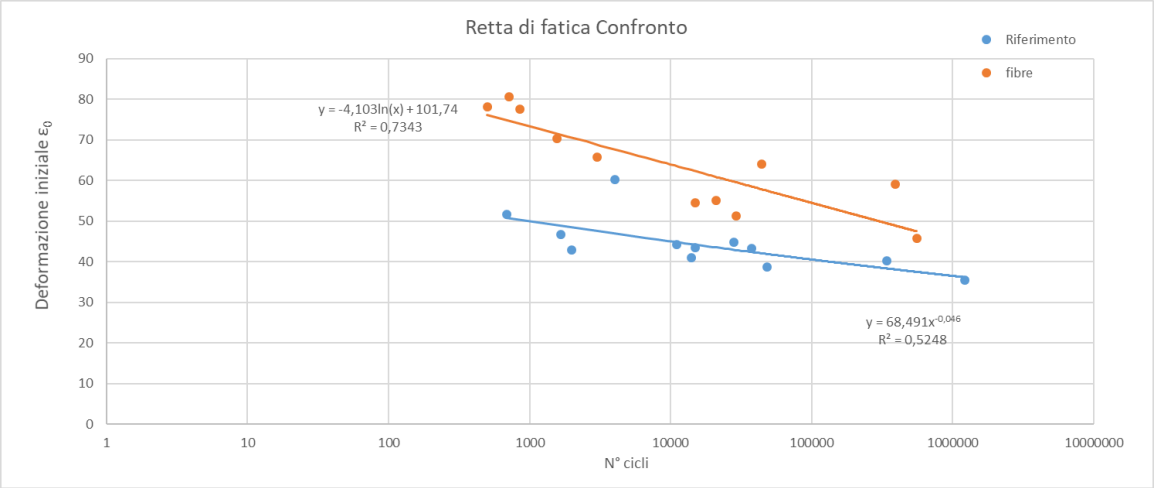

Figura 5.75 - Confronto rette di fatica in termini di deformazione iniziale ε_0

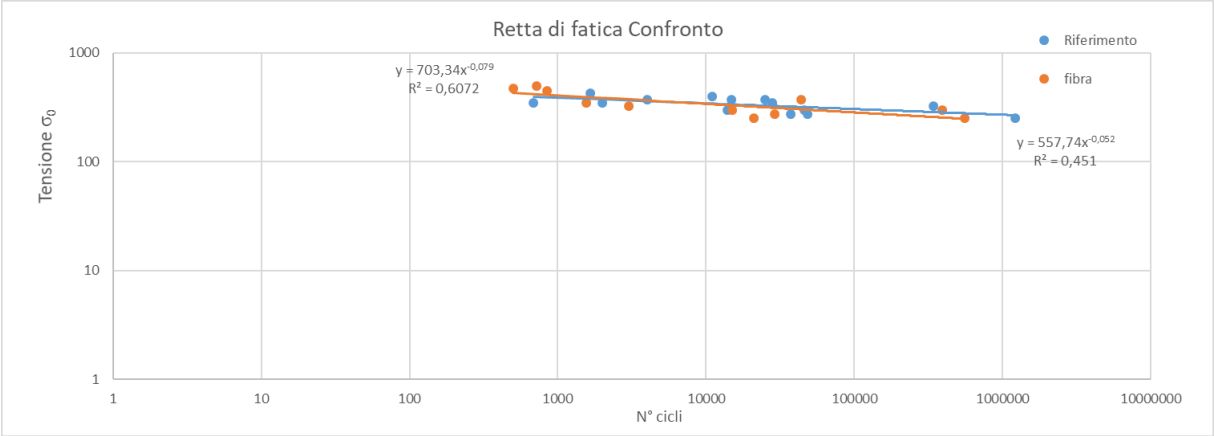

Figura 5.76 - Confronto rette di fatica in termini di tensione iniziale σ_0

Sono stati riportati i vari dati ed eseguite le regressioni lineari fino ad avere un valore di R^2 più vicino possibile a 1: la migliore regressione è avvenuta con la funzione potenza.

Dal confronto si evince che esiste una sostanziale differenza nel comportamento a fatica delle due famiglie, come confermato dai risultati ITSM.

5.3.7 Modulo Complesso a Compressione e Curve Maestre

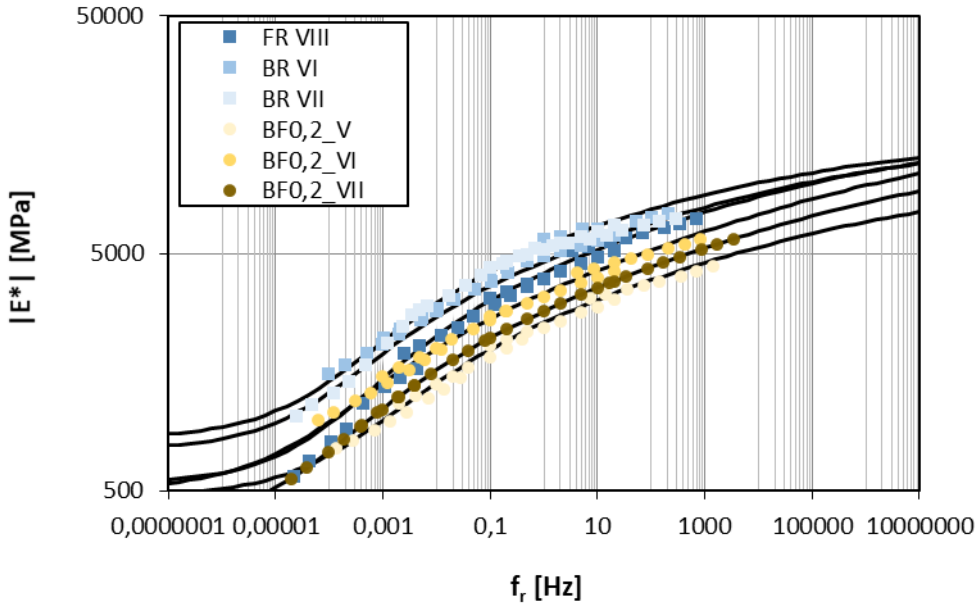

*Figura 5.77 - Confronto Curve Maestre Modulo Complesso E**

Dal confronto delle varie curve maestre si evince che la famiglia di riferimento ha valori più alti e quindi è un materiale più rigido. Le fibre rendono il materiale meno rigido.

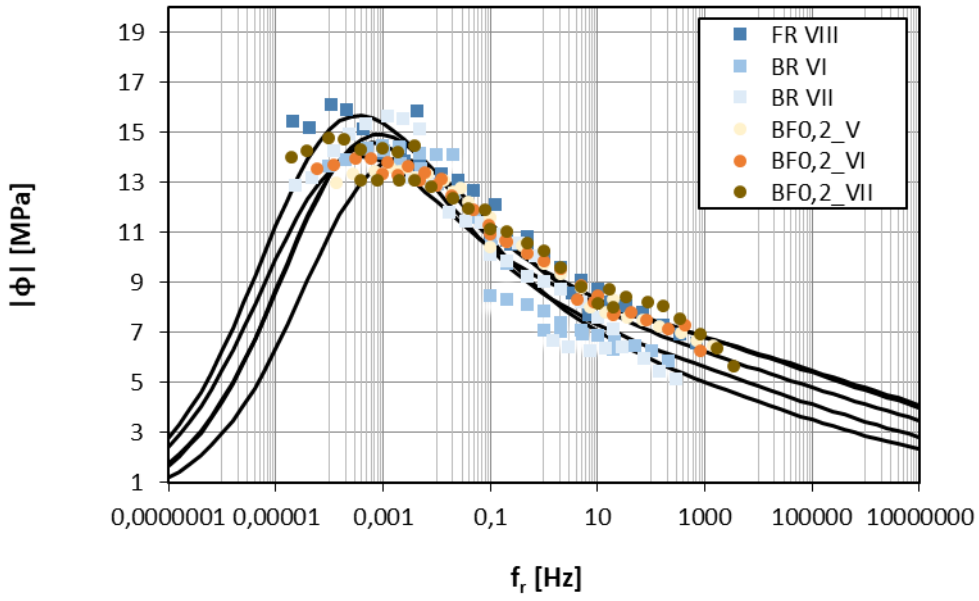

Figura 5.78 - Confronto Curve Maestre Angolo di Fase ϕ

Questa cosa si percepisce anche nel grafico dell'angolo di fase, dove si vede come ad alte frequenze, la famiglia delle fibre ha un valore di angolo di fase più basso, quindi un

comportamento più elastico, mentre a frequenze più basse, i materiali quasi si sovrappongono.

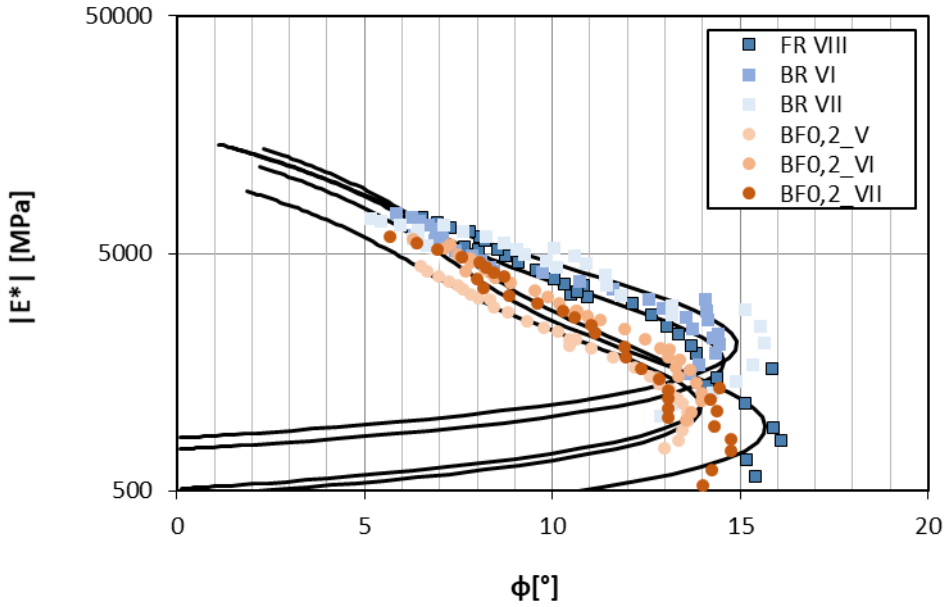

Figura 5.79 - Confronto Diagrammi di Black

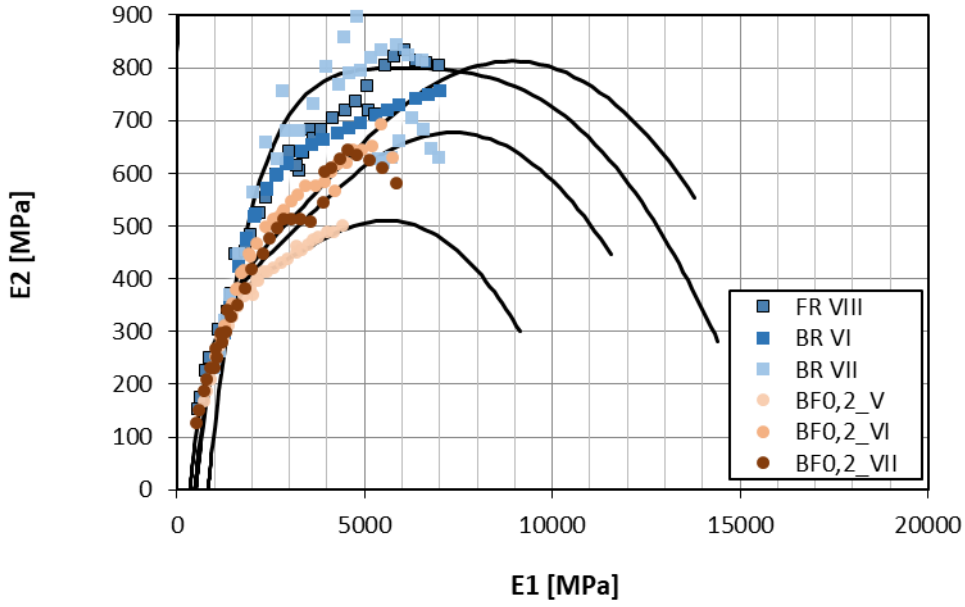

Figura 5.8013 - Confronto Diagrammi di Cole-Cole

Capitolo 6 - Conclusioni

L' obbiettivo della tesi è quello di studiare le prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo alla presenza o meno delle fibre. Lo studio è stato svolto presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche.

In particolare, sono state valutate 2 famiglie di miscele:

- Riferimento
- Fibre

Per ogni famiglia sono stati realizzati:

- 22 provini piccoli
- 10 provini grandi

Sui provini piccoli sono state eseguite prove di:

- 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

Sui provini grandi sono state eseguite prove di:

- Modulo complesso a compressione dopo 30 giorni
- Fatica dopo 30 giorni

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

- La presenza di fibre, conferisce alla miscela un minor addensamento iniziale, ma una lavorabilità leggermente superiore.
- Le fibre non modificano l'influenza dell'acqua sulla miscela come confermano le prove di sensibilità all' acqua eseguite.
- In generale, le due famiglie hanno un trend crescente in termini di ITS e ITSM all'aumentare del grado di maturazione della miscela.

- Nelle prove di rottura ITS, si può notare come il valore ITS nella famiglia delle fibre sia più alto rispetto alla famiglia di riferimento in tutti i gradi di maturazione, eccetto a 30 giorni; ciò è dato dal fatto che le fibre assorbendo acqua, accelerano la maturazione della miscela. Nelle prove ITSM, succede il contrario, infatti ad ogni grado di maturazione la famiglia di riferimento ha il modulo di rigidezza sempre superiore rispetto a quello delle fibre, a qualsiasi grado di maturazione, questo è dovuto al fatto che le fibre hanno più vuoti rispetto alla famiglia di riferimento, questo porta ad una differente rigidezza.
- Dalla prova ITS, possiamo notare come l'energia sottesa alla curva sia molto maggiore nella famiglia delle fibre rispetto a quella di riferimento, e questo vale sia per l'energia pre-rottura che per quella post-rottura.
- La presenza delle fibre porta ad una maggiore resistenza a fatica, e quindi questo può portare a pensare che ci sia una maggiore duttilità del materiale, mentre invece il materiale non è più duttile, ma nel momento in cui dovrebbe iniziare a fessurarsi ciò non accade per la presenza delle fibre.
- Osservando i risultati delle curve maestre del modulo complesso, si nota come già detto in precedenza, che la presenza di fibre rende il materiale meno rigido.

In conclusione, la presenza delle fibre all' interno della miscela, in quantità dello 0,2%, seppur diminuendo la rigidezza del materiale, come si può notare dalle prove ITSM e dalle curve maestre, migliora notevolmente il comportamento post-rottura del materiale, infatti quando dovremmo arrivare a rottura, le fibre entrano in gioco, tenendo insieme il materiale, questo si può notare nelle prove ITS e a fatica, in cui, siccome abbiamo una rottura molto lenta, le fibre funzionano ancora meglio.

Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia

[1] Vivar E., Haddock J. – "HMA Pavement Performance and Durability", 2006.

[2] Anas – "Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture, Volume V", 2019

[3] 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.

[4] Kaloush K. – "Asphalt rubber: Performance tests and pavement design issues", 2014

[5] Foschi R. - "Breve storia del riciclaggio delle pavimentazioni", Le strade, n. 11, 2000.

[6] 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

[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] Foschi R., Bonola M. - "Schema manutentorio integrato delle pavimentazioni stradali", Le strade, n. 4, 2003.

[9] Castagnetta V. - "Il riciclaggio delle pavimentazioni bituminose stradali invecchiate", 1985.

[10] Chen D. – "Evaluation of long-term performance of cold in place recycled asphalt roads", 2006.

[11] Gesto - "Produzione economica di conglomerati a freddo con bitume schiumato", 1999.

[12] Garofalo M. - "Riciclaggio a freddo con impianto mobile", Convention di CGS Group , 2009.

[13] Rosa L. – "Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali", 2010.

[14] Santagata – Chiappinelli - l'influenza del tipo di emulsione sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche di conglomerati bituminosi riciclati a freddo,2001

[15] a. montepara, f. giuliani, s. rastelli - design suggestions for cold recycling with bituminous emulsions of milled asphalt pavements

[16] Compactability and thermal sensitivity of cement–bitumen-treated materials, Andrea Grilli a , Andrea Graziani b & Maurizio Bocci, 2012

[17] Curing and temperature sensitivity of cement–bitumen treated materials, Fabrizio Cardone, Andrea Grilli , Maurizio Bocci & Andrea Graziani, 2014

[18] Volumetric properties and influence of water content on the compactability of cold recycled mixtures, Andrea Grilli . Andrea Graziani . Edoardo Bocci . Maurizio Bocci,2016

[19] Viola P. – "Caratterizzazione avanzata in laboratorio di materie prime secondarie rigenerate o stabilizzate con emulsione di bitume e leganti cementizi", 2013

[20] Giannattasio F. - "Rigeneranti per il fresato", Le Strade, n. 1345, 1999

[21] Ravaioli S. - "Emulsioni bituminose", Siteb, Prima edizione, Settembre 2004

[22] Xu J., Huang S., Qin Y., Li F. – "The Impact of Cement Contents on the Properties of Asphalt Emulsion stabilized Cold Recycling Mixtures", 2011.

[23] Merusi F. – "Metodi reologici avanzati per l'analisi del comportamento dei bitumi stradali negli stati critici di esercizio", 2009

[24] Olard F., Di Benedetto H. - General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes, Road Mater. Pavement Des. 4(2) (2003)

[25] Tesi sperimentale Università Politecnica delle Marche, Di Basilico

Sitografia

[S1] https://it.wikipedia.org/wiki/Ecosostenibilit%C3%A0

[S2] https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi

[S3] https://www.stradeeautostrade.it/asfalti-e-bitumi/materiali-marginali-nelle-miscele-stradali/

[S4] http://www.forta-fi.com/

Ringraziamenti

Vorrei prendermi le ultime righe di questa tesi, per ringraziare le persone che mi hanno aiutato nel produrla e nel raggiungimento dei miei obbiettivi.

In primo luogo ringrazio il mio relatore, Prof. Ing. Maurizio Bocci, per avermi dato la possibilità di approfondire questo argomento, e misurare le mie capacità in questo ambito, che ha sempre destato in me interesse, soprattutto grazie alle sue lezioni e ai suoi corsi.

Desidero inoltre ringraziare, l'Ing. Carlo Carpani e l'Ing. Emiliano Prosperi, che mi hanno introdotto in questa esperienza e sono stati maestri e compagni durante questi mesi passati insieme, sostenendomi sia dal punto di vista professionale che umano.

Un enorme grazie va alla mia famiglia, che mi ha permesso di far fronte a questo percorso e mi è stata accanto, anche nei momenti più difficili, credendo sempre in me e permettendomi di avanzare nella mia esperienza, senza chiedere nulla in cambio ma solo accompagnandomi, come sempre hanno fatto, verso il mio obbiettivo. Ringrazio in particolare i miei genitori, Eugenio e Marisa, i miei fratelli Marina e Federico, e mia nipote Azzurra, che ha portato allegria e spensieratezza nella mia e nelle nostre vite.

Un enorme grazie va ai miei amici di sempre, che in questi anni, hanno sempre avuto un consiglio, o una parola di conforto nei miei confronti, e hanno gioito con me nelle varie piccole soddisfazioni che la carriera universitaria riserva. Inoltre ringrazio tutte le persone incontrate lungo questa tappa della mia vita, di cui non mi scorderò mai il reciproco aiuto, e che hanno condiviso con me le gioie e i dolori di essere studente universitario.

Dedico infine questo traguardo a Rebecca, la persona che riesce sempre a tirare fuori il meglio di me, riuscendo a capire tutte le mie sensazioni e i miei umori, e che per questo ha subito tutti i miei momenti di ansia e scoraggiamento, sopportandoli, sostenendomi sempre, e trasformandoli in momenti positivi, facendomi ripartire ancora più forte, per poi festeggiare anche più di me una volta superate le difficoltà. E anche grazie al suo sostegno che ho raggiunto questo risultato.