



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

Area Strade

**ANALISI PRESTAZIONALE DI BASI A FREDDO FIBRO-
RINFORZATE**

Performance analysis of fiber-reinforced cold bases

Relatore:

Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Carlo Carpani

Tesi di Laurea di:

Alex Di Luca

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

1.	INTRODUZIONE	4
2.	STATO DELL'ARTE	6
2.1.	LA PAVIMENTAZIONE STRADALE	6
2.2.	RICICLAGGIO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO E RAP	9
2.2.1.	RICICLAGGIO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO A CALDO	11
2.2.2.	RICICLAGGIO A FREDDO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO.....	12
2.3.	IMPIEGO DELLE FIBRE DI RINFORZO.....	15
3.	PROGRAMMA SPERIMENTALE E METODI DI PROVA	20
3.1.	OBIETTIVO E RICERCA.....	20
3.2.	METODI DI PROVA	20
3.2.1.	ANALISI GRANULOMETRICA.....	21
3.2.2.	DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA DEGLI AGGREGATI.....	24
3.2.3.	PREPARAZIONE DELLA MISCELA E COMPATTAZIONE	27
3.2.4.	VALUTAZIONE DELLA PERCENTUALE DEI VUOTI.....	37
3.2.5.	ITSM.....	38
3.2.6.	ITS	48
3.2.7.	PROVA DI MODULO COMPLESSO A COMPRESSIONE	52
3.2.8.	PROVA DI FATICA A TRAZIONE INDIRETTA.....	62
3.3.	NOMENCLATURA PROVINI	66
3.4.	TABELLA RIASSUNTIVA PROVE	67
4.	MATERIALI	68
4.1.	FRESATO o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)	68
4.1.1.	RAP FINO	69
4.1.2.	RAP GROSSO.....	70
4.1.3.	RAP 16/20.....	71

4.2.	FILLER DI RECUPERO	72
4.3.	CEMENTO 32.5 R	74
4.4.	EMULSIONE BITUMINOSA	76
4.5.	ACQUA	79
4.6.	FIBRE	80
4.6.1.	FIBRA TESSILE DA RECUPERO DI PFU	80
4.6.2.	FIBRA IN POLIPROPILENE	83
4.7.	MISCELA DI PROGETTO	84
4.7.1.	MISCELA DEGLI AGGREGATI	84
4.7.2.	COMPOSIZIONE DELLA MISCELA DI PROGETTO	86
5.	RISULTATI	89
5.1.	VUOTI	89
5.1.1.	IMPASTO CON FIBRA 1	89
5.1.2.	IMPASTO CON FIBRA 2	90
5.2.	PERDITA D'ACQUA	91
5.2.1.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%	91
5.2.2.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.1%	92
5.2.3.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%	93
5.2.4.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.1%	94
5.3.	ITSM	95
5.3.1.	FIBRA1_0.2%	96
5.3.2.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.1%	97
5.3.3.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%	98
5.3.4.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.1%	99
5.4.	ITS	99
5.4.1.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%	100

5.4.2.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%.....	101
5.5.	MODULO COMPLESSO.....	101
5.5.1.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%.....	102
5.5.2.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA 2_0.2%.....	109
5.6.	ITFT	119
5.6.1.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%.....	119
5.6.2.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.1%.....	120
5.6.3.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%.....	121
5.6.4.	PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.1%.....	123
5.7.	CONFRONTI.....	124
5.7.1.	VUOTI	124
5.7.2.	ITSM.....	124
5.7.3.	ITS	127
5.7.4.	MODULO COMPLESSO	129
5.7.5.	ITFT	136
6.	CONCLUSIONI	139
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	141

1. INTRODUZIONE

Uno dei temi ai quali si è prestata più attenzione negli ultimi decenni, viste anche le grandi catastrofi ambientali, è quello della sostenibilità. La sostenibilità è la condizione di uno sviluppo in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri. Questo concetto trova le più ampie applicazioni, anche nel campo delle infrastrutture, nello specifico nelle pavimentazioni stradali. Sappiamo infatti che questa è costituita da un insieme di strati sovrapposti realizzati con spessori e materiali differenti. Questi strati hanno il compito di trasmettere i carichi di traffico al sottofondo, ossia il terreno su cui essi poggiano. Purtroppo, negli ultimi anni il degrado di questi strati è diventato via via sempre più rapido a causa del forte sviluppo del trasporto su strada e dell'incremento dei carichi di traffico. Inoltre, si sta cercando di aumentare la sicurezza e il confort di marcia e ciò ha portato alla necessità di effettuare interventi di manutenzione delle pavimentazioni stradali molto più frequenti.

L'obiettivo comune di studiare una pavimentazione stradale che sia molto durevole e che porti benefici all'ambiente, alla società e all'economia, quindi che si avvicini alla sostenibilità, trova applicazione nei conglomerati bituminosi riciclati a freddo fibro-rinforzati. Le pavimentazioni stradali realizzate con questa tipologia di conglomerato ci consentono di riutilizzare le enormi quantità di fresato o conglomerato bituminoso di recupero prodotte dai numerosi interventi di manutenzione delle sedi stradali, risparmiare aggregati vergini da cava, ridurre l'inquinamento e la produzione di rifiuti, oltre a risparmiare energia. L'aggiunta di fibre, come osservato per il conglomerato bituminoso tradizionale, a seconda del materiale di cui sono costituite possono migliorare di poco o molto il comportamento a fatica, aumentando quindi la durabilità della pavimentazione.

Lo scopo di questa indagine sperimentale è quello di studiare diversi conglomerati bituminosi riciclati a freddo rinforzati con due tipologie di fibre differenti. Per ciascun tipo di fibra sono state utilizzate due differenti percentuali in volume. Sono stati prodotti e testati diversi provini con l'obiettivo di valutarne le prestazioni, in particolar modo di osservare l'influenza di queste fibre sul loro comportamento a fatica.

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 sono state effettuate delle prove al fine di determinare:

- Determinazione delle proprietà volumetriche (percentuale dei vuoti);
- Determinazione della resistenza ultima a trazione indiretta;
- Determinazione modulo di rigidezza a trazione indiretta;
- Determinazione resistenza a fatica a trazione indiretta;
- Determinazione della curva maestra del materiale, in configurazione di carico in compressione uniassiale.

2. STATO DELL'ARTE

In questo capitolo viene illustrato cos'è la pavimentazione stradale e quali sono le varie tipologie di pavimentazioni stradali che possiamo trovare in sito. Viene descritto inoltre quali sono i vari strati che compongono la pavimentazione stradale e la loro funzionalità. In particolar modo si è dedicata molta attenzione allo strato di base che può essere realizzato con conglomerato bituminoso riciclato a freddo fibro-rinforzato. Si descrive quindi il riciclaggio del conglomerato bituminoso sia a caldo che a freddo e l'impiego delle fibre di rinforzo.

2.1. LA PAVIMENTAZIONE STRADALE

La sovrastruttura o pavimentazione stradale è la parte che si trova più in sommità del corpo stradale, direttamente interessata dal moto dei veicoli. Questa è costituita da un insieme di strati sovrapposti, di spessori e materiali diversi, aventi funzione di sopportare le azioni indotte dal traffico e di distribuirle e trasmetterle, opportunamente attenuate, al terreno di appoggio (sottofondo) o ad altre strutture (requisiti strutturali), nonché di garantire agli utenti condizioni di comfort e sicurezza di marcia (requisiti funzionali). La rigidità della pavimentazione è funzione dei materiali che si utilizzano per realizzare i vari strati e gli spessori degli stessi, dove una maggiore rigidità della pavimentazione stradale implica:

- Maggiore distribuzione delle pressioni sul sottofondo;
- Maggiori sollecitazioni in sovrastruttura;

Come già anticipato la pavimentazione stradale viene realizzata per strati, dove ciascuno strato assolve un particolare compito all'interno del sistema della sovrastruttura:

- Manto o tappeto di usura, ha la funzione di conferire una buona regolarità e aderenza, realizzato con conglomerato bituminoso (miscela costituita da aggregati lapidei legati con bitume) o trattamenti superficiali;
- Binder, svolge la funzione di collegamento tra tappeto d'usura e strato di base ed è realizzato con conglomerato bituminoso;
- Base, ha la funzione strutturale di ripartizione dei carichi e può essere realizzato con conglomerato bituminoso o misto cementato;
- Fondazione, è assegnato il compito di trasmissione dei carichi al sottofondo ed è realizzato in misto granulare o con terre stabilizzate;

In particolar modo lo strato di base è quello dove negli ultimi anni si è iniziato ad utilizzare

conglomerati bituminosi riciclati a freddo. La principale funzione svolta nella pavimentazione è di tipo strutturale, dovendo esso trasferire agli strati sottostanti, in maniera adeguatamente attenuata, i carichi verticali e orizzontali in modo che non si verificino deformazioni o rotture. Il Capitolato Anas consente di realizzare lo strato di base anche tramite riciclaggio a freddo (con impiego di bitume schiumato o emulsione bituminosa). In tal caso, la miscela risulta composta da almeno il 70% di materiale fresato. In caso di miscelazione in impianto la percentuale di fresato può essere integrata con un 30% massimo di aggregato naturale a correzione della curva granulometrica, mentre in sito si impiega il 100% di materiale fresato (corretto con il solo filler di aggiunta). Nel caso di impiego di emulsione bituminosa, gli aggregati sono miscelati con emulsione di bitume modificato e cemento. In questa circostanza il cemento non ha lo scopo principale di aumentare la prestazione meccanica del materiale, ma rappresenta un elemento fondamentale per la formazione del mastice che lega gli aggregati lapidei e permette di regolare la velocità di rottura dell'emulsione. Infatti, il cemento reagisce con l'acqua presente nell'impasto, con conseguente creazione di sottoprodotti di idratazione. Queste reazioni, quindi, contribuiscono ad una riduzione (tramite evaporazione) più veloce dell'acqua che inizialmente tende a riempire i vuoti del materiale. Il conglomerato bituminoso riciclato a freddo può essere realizzato con impianti mobili, o direttamente in situ mediante un "treno" di riciclaggio costituito da: fresa, macchina stabilizzatrice, autobotte per l'acqua, autobotte per l'emulsione, livellatrice, rullo vibrante e rullo gommato. A prescindere dalla modalità realizzativa, va sempre previsto l'ancoraggio dello strato di base allo strato sottostante mediante stesa di opportuna mano d'ancoraggio in legante bituminoso.

(ANAS GRUPPO FS ITALIANE, 02/2019)

Si possono identificare 4 principali tipologie di pavimentazioni stradali in base alle miscele utilizzate e agli strati realizzati:

- Pavimentazione flessibile [Figura 1], ottenuta con conglomerato bituminoso e misto granulare e costituita quindi da uno strato di usura, binder, base e strato di fondazione;



Figura 1 "Pavimentazione flessibile"

- Pavimentazione semi-flessibile, utilizzata solitamente in ambito principalmente aeroportuale, costituita da conglomerato bituminoso intasato, misto granulare o misto cementato;
- Pavimentazione semi-rigida [Figura 2], ottenuta con conglomerato bituminoso e misto cementato e costituita quindi da uno strato di usura, binder, base, sotto-base e strato di fondazione;

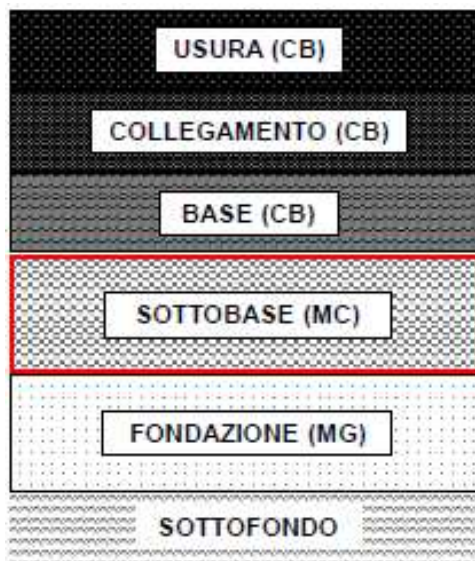


Figura 2 "Pavimentazione semi-rigida"

- Pavimentazione rigida [Figura 3], meno diffusa in Italia, caratterizzata da manto di usura bituminoso, lastra di calcestruzzo, misto granulare o misto cementato;

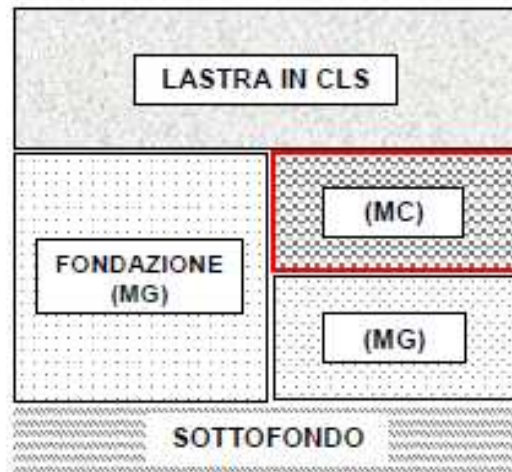


Figura 3 "Pavimentazione rigida"

2.2. RICICLAGGIO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO E RAP

Il riciclaggio del conglomerato bituminoso è una delle tecniche più utilizzate per l'impiego di RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), ossia conglomerato bituminoso di recupero ottenuto dalla fresatura oppure dalla scarifica degli strati della pavimentazione stradale da esso costituiti. L'asportazione di questo materiale può essere fatta con diverse apparecchiature e può essere destinato allo stoccaggio o al reimpiego nello stesso sito.

Le frese a freddo sono le macchine maggiormente impiegate e permettono di ottenere determinate pendenze trasversali della pavimentazione sottostante e opportuni valori dei profili. Queste macchine consentono di demolire in modo selettivo i vari strati della pavimentazione e quindi separare le varie tipologie di conglomerato bituminoso demolito. Per tale motivo è anche opportuno, in fase di stoccaggio, predisporre cumuli separati e distinti per ciascuna tipologia omogenea di RAP. Nel caso di riciclaggio in impianto, sarebbe inoltre importante coprire il fresato in fase di stoccaggio, in modo da evitare una sua esposizione prolungata agli agenti atmosferici, poiché l'umidità che può accumulare può creare problemi in fase di miscelazione degli aggregati. Il materiale ottenuto dopo l'applicazione delle frese prende il nome di fresato [Figura 4].



Figura 4 "Fresato o RAP"

L'utilizzo del RAP permette vantaggi sia economici che ambientali quali:

- limitazione dell'inquinamento dovuto al trasporto e all'incenerimento dei rifiuti;
- riduzione della quantità di materiale portato in discarica;
- riutilizzo di risorse non rinnovabili al posto di aggregati vergini;
- risparmio economico grazie ad un minor uso di materiali di primo impiego (aggregati e bitume) e alla limitazione dei costi di smaltimento, essendo il fresato classificato come rifiuto speciale con codice C.E.R. 17 03 02;
- conservazione dell'energia;

Le caratteristiche del RAP dipendono strettamente dal tipo di conglomerato bituminoso utilizzato e dalle proprietà dei materiali che lo costituiscono. Si possono utilizzare diverse tecniche di riciclaggio del RAP in funzione di diversi aspetti:

- le caratteristiche del materiale da riciclare;
- il tipo di legante;
- il luogo di realizzazione della miscela (in situ o in centrale);
- la temperatura del procedimento (a caldo o a freddo);

Il riutilizzo del RAP è sempre combinato all'aggiunta di leganti bituminosi e/o cementizi, questo perché la mancanza della frazione fine legante non consente lo sviluppo di attrito interno da parte dei granuli, dunque una scarsa capacità portante. Questo è uno dei motivi per cui il solo RAP non può essere impiegato per la realizzazione di sottofondi o strati di fondazione, ma trova buona applicazione per la realizzazione di strati di base aggiungendo la frazione granulometrica mancante e il legante.

Prima di confezionare la miscela è opportuno analizzare le caratteristiche del conglomerato di

recupero attraverso il prelievo di campioni e successiva analisi in laboratorio per definire i seguenti aspetti:

- curva granulometrica;
- percentuale di legante;
- tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- invecchiamento del legante;

È di fondamentale importanza assicurarsi che il legante originario sia in grado di recuperare, nel caso di riciclaggio a caldo, le caratteristiche perse a seguito dell'invecchiamento e conseguente ossidazione, sia per verificare che non diventi eccessivamente "rigido" a causa degli aggregati, elementi principali del fresato di origine calcarea o silicea. È importante stabilire la natura del legante e degli aggregati e dunque predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la reciproca compatibilità, l'opportuna lavorabilità dell'impasto e l'idonea presa finale.

Le tecniche che ci consentono di reimpiegare il materiale distinte in funzione della procedura di miscelazione tra gli aggregati vergini e quelli di risulta sono:

- riciclaggio a freddo;
- riciclaggio a caldo;

Queste due tecniche possono essere eseguite sia in sito che in impianto fisso e la scelta del tipo di riciclaggio da eseguire dipende dalle esigenze, dall'intervento da realizzare e dalle possibilità economiche.

(Santagata, 2019)

2.2.1. RICICLAGGIO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO A CALDO

Il riciclaggio del conglomerato bituminoso a caldo è una delle tecniche utilizzate per il reimpiego del RAP. Con riciclaggio a caldo si intendono tutte quelle tecniche in cui il fresato viene impiegato nella confezione di conglomerato bituminoso a caldo. La tecnica a caldo permette di utilizzare tra il 10-40 % di fresato, riscaldando gli aggregati ad una temperatura almeno superiore ai 110 °C. In particolar modo le norme tecniche del capitolato dei principali enti che si occupano di strade prevedono limiti all'impiego del fresato:

- 30% nei conglomerati per strati di base;
- 25% nei conglomerati per strati di binder;
- 15-20% nei conglomerati per strati di usura.;

Purtroppo, l'utilizzo di conglomerato bituminoso di recupero nella nuova miscela fa sorgere problemi omogeneità della miscela, riduzione della lavorabilità e riduzione delle prestazioni. Come già anticipato, per risolvere problemi di omogeneità è necessario effettuare una demolizione selettiva dei vari strati della pavimentazione, effettuare uno stoccaggio differente per ciascun tipo di conglomerato, la vagliatura per la formazione di classi granulometriche e la frantumazione di grumi e placche più grandi. Il riscaldamento del fresato, che avviene nel tamburo essiccatore, comporta una notevole emissione di fumi e polveri durante i processi di produzione e posa in opera, inoltre tale procedura comporta un forte invecchiamento del legante con conseguente riduzione della lavorabilità e durabilità del conglomerato bituminoso. Solitamente il mastice costituito dal legante nuovo e da una parte del legante vecchio non riesce a garantire il raggiungimento delle caratteristiche volumetriche e meccaniche previste per il conglomerato bituminoso senza fresato; pertanto, è spesso necessario l'uso di additivi. Nel riciclaggio a caldo vengono utilizzati additivi come rigeneranti impiegati per il reintegro delle sostanze aromatiche e fluidificanti per la riduzione della viscosità. Questi additivi possono essere inseriti nel bitume nuovo o sul fresato.

Il riciclaggio a caldo può essere effettuato in situ o negli impianti. Il riciclaggio a caldo in situ presenta il vantaggio di evitare la movimentazione e lo stoccaggio del materiale recuperato dalla pavimentazione da riqualificare, ma richiede l'impiego di macchine di cantiere molto più costose e complesse. Tuttavia, questa tecnica non ha mai trovato ampio uso nel campo del riciclaggio a causa dell'elevatissimo quantitativo di sostanze dannose che emette in atmosfera. Questa tecnica trova tuttavia largo impiego quando si hanno ammaloramenti della parte superficiale della pavimentazione come sgranamento, buche, perdita dei requisiti di aderenza e ormaiamento.

(Bocci, 2019)

2.2.2. RICICLAGGIO A FREDDO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO

Il riciclaggio a freddo è la tecnica alternativa al riciclaggio a caldo (per strati di base o sottobase) ed anche in questo caso può essere applicata sia in impianto fisso che in situ. Questa tecnica consiste nell'utilizzare fresato a temperatura ambiente, senza che esso venga riscaldato, con l'aggiunta di aggregati freddi e umidi, con o senza cemento, con bitume schiumato o più frequentemente emulsione bituminosa e con la possibilità di impiegare tra l'80-100 % di fresato, come descritto dalle norme tecniche del capitolato dei principali enti .

I vantaggi che si hanno con il riciclaggio a freddo del fresato sono molteplici:

- Un minore impatto ambientale dovuto al riciclaggio di conglomerato bituminoso e una riduzione dell'utilizzo di aggregati vergini e quindi la riduzione dell'attività estrattiva;
- Una riduzione significativa delle emissioni di gas e fumi in ambiente prodotti dal riscaldamento del fresato e del bitume;
- Una riduzione dei costi dovuta alla sostituzione di aggregati vergini con fresato e dal risparmio di energia prima necessaria per riscaldare il fresato e il bitume;
- La salvaguardia della salute dei lavoratori grazie alla riduzione delle emissioni di fumi;

Come già anticipato il riciclaggio a freddo del fresato può avvenire in sito o in impianto a seconda delle esigenze, dell'intervento da realizzare e delle possibilità economiche. Con il riciclaggio in sito tutto il processo avviene sulla strada stessa mediante l'utilizzo di una grande macchina chiamata "treno". Possiamo avere 2 differenti tipologie di treni:

- Il treno ad unità multipla utilizzati in passato;
- Il treno ad unità singola [Figura 5] detto anche riciclatrice che svolge simultaneamente il compito delle stabilizzatrici e fresatrici e possono essere sia macchine cingolate che gommate.



Figura 5 "Treno ad unità singola"

Queste sono costituite principalmente da un rotore di fresatura e miscelazione [Figura 6] munito di lame e mazze per la frantumazione del conglomerato bituminoso. Questa macchina aggiunge la componente liquida, quale acqua di aggiunta e legante bituminoso, mediante un ugello situato all'interno del vano di miscelazione. La componente secca di integrazione quali cemento, filler e l'eventuale aggregato vergine vengono spesso posizionati sulla pavimentazione stradale ammalorata prima del passaggio della riciclatrice;



Figura 6 "Rotore di fresatura e miscelazione"

Il riciclaggio a freddo in sito del conglomerato bituminoso è generalmente vantaggioso rispetto a quello in impianto in quanto si ha un minor costo di costruzione ed una durata dell'intervento minore, senza considerare la riduzione del rischio di incidenti e del disagio per gli utenti che trovano tutte le strumentazioni per le lavorazioni situate lungo un'unica corsia di marcia.

Per quanto concerne il riciclaggio in impianto questo consiste innanzitutto nel trasportare il fresato in impianto, selezionarlo mediante frantumazione e vagliatura, per poi mescolarlo con il legante e riportarlo sulla stessa strada dove viene steso. La tecnica del riciclaggio in impianto viene usata principalmente in caso di nuove costruzioni utilizzando il conglomerato bituminoso di recupero accumulato in precedenza.

I materiali che vengono utilizzati per il riciclaggio a freddo sono:

- Conglomerato bituminoso di recupero che dovrà essere della stessa natura dello strato che si andrà a realizzare (o al massimo conglomerato di strati sovrastanti);
- Aggregati "bianchi" di riciclo o naturali, ossia aggregati "vergini" mai miscelati con bitume, utilizzati per correggere la curva granulometrica oppure per integrare il fresato non sempre disponibile insieme anche all'utilizzo di filler;
- Cemento (utilizzato spesso) come cemento Portland, Portland composito, cemento d'altoforno o pozzolanico per conferire un buon comportamento del conglomerato bituminoso in termini di resistenza e fungere da catalizzatore favorendo la rottura dell'emulsione bituminosa;

- Acqua di aggiunta, necessaria per ottenere un ottimo contenuto di acqua, ossia quello che consente di ottenere un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione inferiore all'1% ed il più elevato valore di massa volumica della miscela secca nonché una migliore lavorabilità della miscela;
- Legante bituminoso che può essere emulsione bituminosa per strati di base e di fondazione, ma anche bitume schiumato per strati di fondazione. L'emulsione bituminosa è composta da due liquidi, uno disperdente ossia l'acqua e l'altro disperso dunque il bitume. Successivamente alla miscelazione con il materiale, l'acqua viene eliminata e le particelle di bitume si aggregano, formando una pellicola ininterrotta che, depositandosi sulla superficie dell'inerte, lo riveste (si parla in questo caso di "rottura" dell'emulsione). Nel bitume schiumato invece si unisce acqua con bitume caldo (a 180°C) dove si genera una reazione di espansione con formazione di bolle di vapore rivestite da bitume. Quando le bolle scoppiano, a causa dell'instabilità della massa schiumosa, i frammenti di bitume si disperdono tra gli aggregati lapidei e aderiscono alla frazione fine, creando una malta che lega gli elementi più grossolani. Per individuare il dosaggio ottimale di legante si fa riferimento ad una miscela di progetto che fornisce il modulo di rigidezza a 20 °C più piccolo tra quelli che risultano maggiori di 3000 Mpa e una resistenza a trazione indiretta dopo imbibizione maggiore del 70% di quella ottenuta su provini non immersi in acqua;

È di fondamentale importanza progettare un buon mix design facendo attenzione ad una corretta composizione granulometrica, un ottimale contenuto d'acqua ed un corretto dosaggio dei leganti.

(Santagata, 2019)

2.3. IMPIEGO DELLE FIBRE DI RINFORZO

Lo studio e l'esperienza ci hanno insegnato negli anni che le sovrastrutture stradali richiedono un continuo miglioramento delle loro prestazioni in quanto si è sempre più diretti verso un aumento del volume di traffico, dei carichi, delle velocità e frequenze di passaggio.

Spesso l'unica soluzione praticabile rimane l'aumento degli spessori della pavimentazione in funzione delle sollecitazioni prodotte dai carichi e alla portanza dei sottofondi realizzati negli anni precedenti. Sappiamo bene, però, che soprattutto negli ultimi decenni si è reso necessario mirare ad una progettazione che possa salvaguardare:

- l'ambiente;
- la società;
- l'economia;

Per raggiungere questo obiettivo di sostenibilità non è sufficiente procedere con le tecniche convenzionali di progettazione, che oggi possono sembrare in certi casi inadeguate, ma è necessario impiegare sistemi di rinforzo per pavimentazioni stradali. Questi sistemi sono realizzati molto spesso con materiali all'avanguardia che consentono di aumentare di molto la vita utile della pavimentazione.

Grazie all'impiego di questi sistemi si riescono ad ottenere molteplici benefici:

- ottimizzazione dei costi di intervento;
- possibilità di realizzare spessori minori di pavimentazione e di conseguenza facilità nel rispetto delle quote del piano viabile;
- notevole estensione degli intervalli di manutenzione che a loro volta producono un aumento della sicurezza, la diminuzione dell'impatto sulla viabilità e sull'ambiente;

Per sistemi di rinforzo della pavimentazione stradale si intende qualsiasi inserto che viene inserito all'interno del pacchetto bituminoso. Possiamo avere 2 differenti tipologie di sistemi di rinforzo:

- le fibre;
- le reti;

Le reti possono essere reti di armatura (geo-griglie) in fibra di vetro, fibra di carbonio, fibre sintetiche [Figura 7] e geo-compositi, oppure geo-membrane che hanno come obiettivo quello di fungere da fogli flessibili continui realizzati spesso con materiali bituminosi. A loro volta, le reti di armatura possono essere strutturali o conservative. Si dicono conservative quando consentono di prolungare la vita utile della pavimentazione ritardando determinati processi di degrado quali l'accumulo di deformazioni plastiche e la propagazione di fessure con relativa infiltrazione di acqua all'interno della sovrastruttura stradale, costituite da materiali tipo fibra di vetro. Le reti di armatura strutturali sono quelle realizzate in fibra di carbonio e che incrementano la capacità portante della pavimentazione stradale.

(Sergio Finozzi, 2020)



Figura 7 "Geo-griglia sintetica"

Le fibre possono essere di diversi materiali e presentarsi sotto diverse forme. Si possono avere fibre sotto forma di filamenti o pellets [Figura 8]. Possiamo avere fibre naturali come la cellulosa, minerali come quelle in vetro, ma anche sintetiche come le fibre polimeriche. Negli impianti di produzione il dosaggio di queste fibre può avvenire tramite l'ausilio di unità mobili, le quali consentono l'inserimento delle fibre direttamente durante la fase di mescolazione (dopo il riscaldamento degli aggregati e prima dell'aggiunta del bitume), sia per impianti di tipo continuo sia per quelli di tipo discontinuo. Per quanto concerne il dosaggio delle fibre nella fase di riciclaggio in sito è sufficiente stendere il materiale sulla pavimentazione stradale prima del passaggio della macchina riciclatrice.



Figura 8 "Fibre in cellulosa"

I benefici che conferiscono queste fibre sono molteplici e la significatività varia a seconda del tipo di fibra che si va ad impiegare e dal quantitativo:

- aumento della vita utile della pavimentazione;

- incremento della resistenza a trazione del conglomerato bituminoso;
- rallentamento della formazione di fessure nella pavimentazione;
- aumento della resistenza all'ormaiamento della pavimentazione;
- aumento della resistenza a fatica del conglomerato bituminoso;
- incremento della resistenza a fatica termica del conglomerato bituminoso;
- funzione stabilizzante e addensante nei conglomerati bituminosi a caldo riducendo il rischio di separazione tra bitume e aggregato nelle fasi di trasporto e posa in opera (fibre in cellulosa);
- maggiore aderenza nel caso di tappetini di usura grazie ad una maggiore rugosità superficiale;

(L'impiego di fibre e compound fibre/polinmeri nei conglomerati bituminosi Slittmastix Asphalt, 2018)

Un'applicazione di fibre nei conglomerati bituminosi a caldo viene illustrata nelle Direttive Tecniche per Pavimentazioni Bituminose della provincia autonoma di Bolzano e prende il nome di Tappeto di Usura tipo Splittmastix. Lo splittmastix è un conglomerato bituminoso caratterizzato dalla presenza di una elevata quantità di graniglia e da un "mastice" costituito da bitume + filler + fibre stabilizzanti (splitt-mastix asphalt). Le particolari caratteristiche granulometriche (e litologiche) degli inerti impiegati unitamente ad un alto contenuto di legante modificato con polimeri consente a questo tipo di pavimentazione di fornire prestazioni di assoluto livello in termini di durabilità, stabilità e resistenza alle deformazioni, rugosità superficiale e resistenza all'ormaiamento. Gli aggregati grossi e fini sono costituiti da elementi ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali (rocce, aggregati naturali tondeggianti, aggregati naturali a spigoli vivi). Il legante da impiegare è un bitume semisolido contenente polimeri elastomerici e plastomerici che ne modificano la struttura chimica e le caratteristiche fisiche e meccaniche. Gli additivi sono prodotti naturali o artificiali che, aggiunti agli aggregati o al bitume, consentono di migliorare le prestazioni dei conglomerati bituminosi. Le fibre minerali nelle miscele ricche di graniglia e povere di sabbia hanno una funzione stabilizzante del mastice (filler + bitume) evitandone la separazione dallo scheletro litico e possono essere di cellulosa, vetro o acriliche. Questo conglomerato deve essere confezionato mediante impianti fissi automatizzati, di idonee caratteristiche, mantenuti sempre perfettamente funzionanti in ogni loro parte. Si possono impiegare anche impianti continui

(tipo drum-mixer) purché il dosaggio dei componenti la miscela sia eseguito a peso, mediante idonee apparecchiature la cui efficienza deve essere costantemente controllata.

(DIRETTIVE_TECNICHE_2013_TESTO_UNICO_IT, 2013)

3. PROGRAMMA SPERIMENTALE E METODI DI PROVA

Lo scopo del seguente capitolo è quello di descrivere il programma sperimentale, con le varie apparecchiature che sono state adoperate, le metodologie di prova che sono state seguite e quindi i relativi obiettivi.

3.1. OBIETTIVO E RICERCA

L'obiettivo della presente analisi sperimentale concerne lo studio di varie tipologie di fibre di rinforzo al fine di migliorare le prestazioni di conglomerati bituminosi riciclati a freddo impiegati per la realizzazione di strati di base. Per condurre tale sperimentazione sono state studiate due tipologie di fibre con diversi dosaggi:

- Fibre tessili provenienti da PFU (pneumatici fuori uso) con dosaggio 0.2% con la quale sono stati prodotti 17 provini. In questa analisi sperimentale tale fibra viene denominata fibra 1;
- Fibre tessili provenienti da PFU con dosaggio 0.1% con la quale sono stati prodotti 8 provini;
- Fibre in polipropilene (usualmente impiegate nei calcestruzzi) con dosaggio 0.2% con la quale sono stati prodotti 17 provini. In questa analisi sperimentale tale fibra viene denominata fibra 2;
- Fibre in polipropilene con dosaggio 0.1% con la quale sono stati prodotti 8 provini;

Per valutare l'efficacia di queste fibre sono stati fatti confronti sia tra prestazioni meccaniche di provini con stesse fibre e dosaggi differenti, che tra provini con fibre differenti, ma anche confronti tra provini contenenti fibre e privi di fibre.

3.2. METODI DI PROVA

I metodi di prova che sono stati applicati per valutare le prestazioni meccaniche dei vari provini sono i seguenti:

- PROVA ITSM;
- PROVA ITS;
- PROVA DI MODULO COMPLESSO A COMPRESSIONE;
- PROVA DI FATICA A TRAZIONE INDIRETTA;

Prima di sottoporre i provini a tali prove è stato necessario innanzitutto studiare una ricetta,

per poi impastare il materiale e confezionare i provini. L'analisi sperimentale è stata svolta nel Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche. Per progettare la ricetta è stato necessario effettuare:

- Un'ANALISI GRANULOMETRICA, al fine di ottenere la curva granulometrica del fresato fino e grosso e determinare le porzioni di questi ultimi, oltre che di filler e del fresato 16-20 mm, utilizzati per ottenere una miscela ricadente all'interno del fuso granulometrico di riferimento. Si è fatto riferimento al fuso granulometrico del "Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano";
- Un'ANALISI DELLA MASSA VOLUMICA DEGLI AGGREGATI MEDIANTE PICNOMETRO, fatta al fine di determinare la massa volumica degli aggregati impiegati ed il quantitativo di acqua di assorbimento da impiegare per le varie ricette;
- Un'ANALISI DELLA PERCENTUALE DEI VUOTI DEI MATERIALI;

3.2.1. ANALISI GRANULOMETRICA

L'analisi granulometrica è una procedura che avviene mediante l'impiego di setacci [Figura 9] e ci consente di vagliare del materiale con il quale poi poter ottenere una curva granulometrica. La vagliatura può avvenire sia per via umida che per via secca, nel nostro caso è stata effettuata una vagliatura per via secca.



Figura 9 "Setacci per analisi granulometrica"

Il primo passo è quello di prelevare una porzione di fresato (quartatura) e lavare il campione utilizzando 2 setacci, uno da 63 micron che funge da fondo e l'altro da 4 mm. Il lavaggio viene effettuato mediante un getto d'acqua fino a quando l'acqua in uscita dal setaccio non appare

chiarificata. Una volta lavato il fresato questo viene messo in forno a 50 °C per un giorno circa, fino a quando non raggiunge un peso costante, ossia il materiale ha perso tutta l'acqua interstiziale e può essere utilizzato per l'analisi granulometrica. Noto quindi il peso del materiale da studiare si preparano i setacci da utilizzare per la prova. Questi setacci vengono impilati uno sopra l'altro, facendo attenzione a disporre la retinatura di diametro in ordine crescente partendo dal basso, dove alla base e in sommità avremo rispettivamente un fondo chiuso e un coperchio. In Tabella 1 si riportano i setacci utilizzati:

DIAMETRO [mm]
31.5
20
16
10
8
4
2
1
0.5
0.25
0.125
0.063
FONDO

Tabella 1 "Diametro aperture setacci per Analisi Granulometrica"

Una volta preparati i setacci si prende il campione di materiale ottenuto per quartatura e si versa nel primo setaccio posto in sommità della pila. Successivamente si chiude la testa della pila con un coperchio facendo attenzione a sigillare bene con nastro adesivo le interfacce tra il 1° e 2° setaccio e quella tra il fondo e il penultimo setaccio. Ciò viene fatto al fine di impedire perdita di materiale fine. Di seguito la pila di setacci viene posizionata in uno scuotitore chiamato vibrovaglio [Figura 10], fissata attraverso le apposite morse e fatto lavorare per 15 minuti per facilitare il passaggio degli aggregati. Ovviamente i materiali più fini si sposteranno

verso i setacci posti in basso mentre quelli più grossolani saranno trattenuti dai setacci posti più in sommità.



Figura 10 "Vibrovaglio per analisi granulometrica"

Terminata la procedura di scuotimento, si pesa il materiale trattenuto da ciascun setaccio versandolo su di una apposita teglia posta su di una bilancia tarata e assicurandosi di far cadere tutto il materiale dando dei piccoli colpi e rimuovendo tutti quei granuli rimasti incastrati nelle aperture. Si inizia la procedura partendo dal materiale più fine e si misura quindi il trattenuto parziale espresso poi in percentuale mediante la seguente formula, dato N il numero totale dei setacci:

$$T_i = 100 \cdot \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_j}$$

Dove:

- T_i = trattenuto parziale in percentuale;
- P_i = passante all' i -esimo setaccio;

Calcolato il trattenuto parziale ricavo il trattenuto cumulativo di ciascun setaccio ossia la sommatoria del trattenuto dell' i -esimo setaccio più quello dei setacci sovrastanti. Di seguito si mostra la formula utilizzata:

$$TC_i = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^i P_j}{\sum_{j=1}^N P_j}$$

Dove:

- TC_i = trattenuto cumulativo in percentuale;

- P_j = passante al j-esimo setaccio sovrastante;

Infine, si calcolano i passanti cumulativi per ciascun setaccio, ossia la parte complementare a 100 dei trattenuti cumulativi, espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione seguendo tale formula:

$$PC_i = 100 - TC_i$$

Calcolati i trattenuti cumulativi per ciascun setaccio si procede con l'elaborazione dei dati attraverso la creazione di grafici detti curve granulometriche che rappresentano il risultato dell'analisi granulometrica. Questo grafico è caratterizzato dall'asse delle ordinate sul quale è riportata la percentuale del materiale trattenuto dal rispettivo setaccio, mentre sull'asse delle ascisse è riportata l'apertura dei vari setacci in scala logaritmica. La curva granulometrica [Figura 11] ottenuta per ogni materiale è stata in seguito utilizzata per la realizzazione della curva di progetto e quindi per il calcolo delle quantità di ogni singola pezzatura da impiegare nelle miscele.

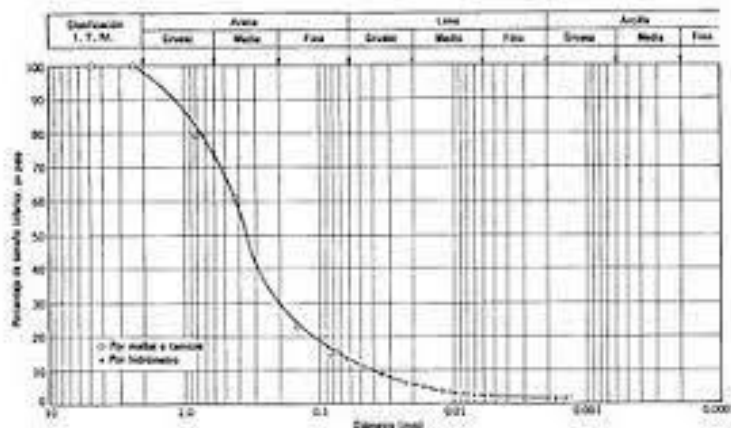


Figura 11 "Esempio di curva granulometrica"

3.2.2. DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA DEGLI AGGREGATI

Al fine di determinare la massa volumica degli aggregati e l'assorbimento d'acqua si utilizza uno strumento denominato picnometro in vetro [Figura 12].



Figura 12 "Picnometro in vetro"

La massa volumica è stata determinata sia per il fresato fino che per il fresato grosso pertanto sono stati impiegati due differenti picnometri:

- Nel primo picnometro sono stati messi circa 0.6 Kg di fresato grosso, ossia fresato con una pezzatura tra 4 mm – 31.5 mm, precedentemente setacciato;
- Nel secondo picnometro è stato messo circa 0.3-0.4 Kg di fresato fine, ovvero fresato con una pezzatura compresa tra 0.063 mm – 4 mm;

Ciascun picnometro viene pesato prima e dopo l'aggiunta di fresato in modo tale da conoscere sia la tara di ciascun picnometro che il peso netto di fresato aggiunto. Successivamente si aggiunge acqua all'interno dei picnometri fino a sommergere totalmente il fresato presente al loro interno. Fatto ciò, si mettono i due picnometri con 3 litri d'acqua in camera climatica a 20 °C per 1 giorno. Il giorno seguente, si esegue la procedura di vuoto per 15-20 minuti, cercando di arrivare ad una pressione leggibile sul manometro della pompa di vuoto almeno pari a 0.85 atm. Fatto ciò, si prende l'acqua condizionata a 20 °C e si terminano di riempire i 2 picnometri fino al menisco situato sul tappo, poi si rimette il tappo a ciascun picnometro facendo in modo che esca l'acqua in eccesso. Si asciugano esternamente i picnometri e si pesano trovando così la massa lorda del picnometro. Al momento della pesa si verifica mediante l'utilizzo di un termometro ad ago che la temperatura dell'acqua sia $22 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Da questo punto in poi la procedura si separa in due metodi diversi, uno per la pezzatura grossa e uno per la pezzatura fine:

- Per il picnometro contenente fresato grosso, il contenuto viene versato in un setaccio con apertura 2 mm, in modo da far defluire solo l'acqua. Il trattenuto viene posizionato su una teglia larga su cui è stato apposto un panno assorbente. Il materiale steso viene tamponato con un panno fino a raggiungere la condizione di superficie satura asciutta (SSA), ovvero l'aggregato deve essere umido ma non deve avere il film d'acqua sulla superficie. Viene pesata una teglia in alluminio vuota, misurando la grandezza tara1. Su questa teglia viene versato il materiale in condizione SSA e si ottiene la massa M1 per sottrazione con tara1. A questo punto la teglia viene inserita in un forno a 40°C e il giorno successivo si va a pesare la teglia con il materiale asciutto e sottraendo tara1 si ottiene la massa M4, massa dell'aggregato asciutto. Si prende il picnometro vuoto con il tappo inserito, si riempie d'acqua fino al menisco e si misura la massa M3 e la temperatura che non deve variare più di 2°C da T1.
- Per il picnometro contenente il fresato fine, il contenuto viene versato in un setaccio da 0,063 mm in modo da separare aggregati e acqua. 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. Vengono utilizzati tre attrezzi: un cono cavo, una spatola e un pistone. Questi tre attrezzi vengono dapprima pesati insieme al materiale per avere la tara, poi, dopo un determinato intervallo di tempo, la teglia viene tolta dal forno e grazie agli attrezzi si va ad inserire del materiale nel cono. Tramite il pistone si danno 25 colpi sul materiale e si toglie il cono. A questo punto bisogna valutare la forma assunta dal materiale contenuto nel cono, confrontandola con la Figura 13:

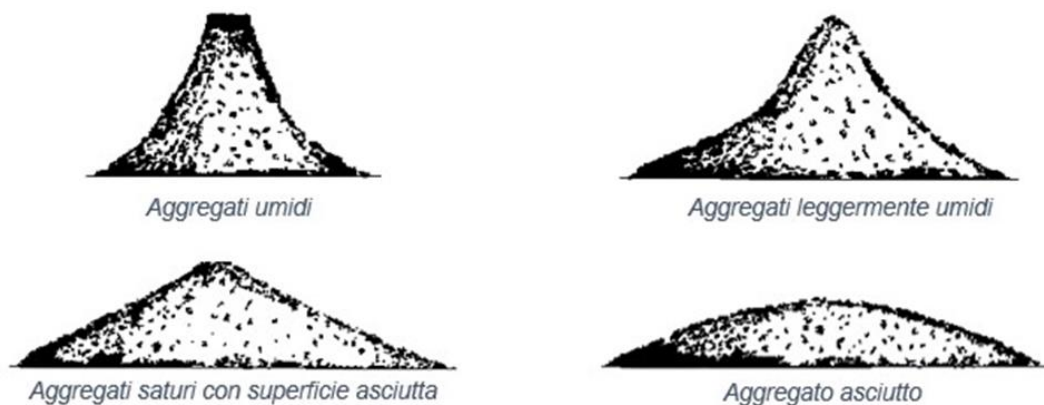


Figura 13 "Schema di riferimento per la forma del materiale dopo la rimozione del cono"

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

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

- Massa volumica apparente dei granuli:

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

- Massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa:

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

- Massa volumica dei granuli in condizioni di SSA:

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

- Assorbimento dell'acqua:

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

La massa volumica dell'acqua ρ_w dipende dalla temperatura e si ricava dalla Tabella 2:

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

Tabella 2 "Parametri funzione della temperatura per il calcolo della massa volumica dell'acqua"

3.2.3. PREPARAZIONE DELLA MISCELA E COMPATTAZIONE

La preparazione delle porzioni di materiale necessari per il confezionamento dei provini deve avvenire almeno 12 ore prima della fase di miscelazione e compattazione. Questo viene fatto perché è fondamentale avere aggregati quali fresato grosso, fine e fresato 16-20 con sola acqua di assorbimento al fine di controllare totalmente il contenuto d'acqua degli aggregati ed inoltre simulare le condizioni dell'aggregato presente in sito o nell'impianto di produzione.

Oltre alla preparazione del fresato vengono porzionati anche in peso i quantitativi di filler, fibre, acqua di assorbimento e cemento, al fine di velocizzare i tempi di miscelazione il giorno seguente. L'emulsione bituminosa e l'acqua di aggiunta vengono dosati in peso il giorno della miscelazione. I dosaggi in peso delle varie componenti che caratterizzano l'impasto sono dettati da una ricetta studiata ad hoc come quella mostrata nella Tabella 3:

Column	1	2		3
ID	Name	Dosage	Dosage	Dosage
	[-]	[g]	[g]	[g]
RA1	Fino (Lucidi)	11383		11383
RA2	Grosso setacc. (Lucidi)	10692		10692
VA1	Grosso (16-20)	1777		1777
VA2	-	0		0
VA3	-	0		0
VA4	-	0		0
Filler	recupero	1471		1471
Water (abs)		362,4		362,4
Cement	C1-ref	506		506
Emulsion		1013		1013
Water di aggiunta		499		499
TOTAL		27702		27702
total for each specimen		2841,3		2841,3
		FIBRE GOMMA (0.2% SU AGGREG.)	51,7	

Tabella 3 "Ricetta esemplificativa"

Gli aggregati porzionati vengono messi in forno a 40°C fino al raggiungimento della massa costante in modo tale da essere completamente asciutti. Una volta quindi preparati tutti gli ingredienti si mette il fresato fine, il fresato grosso e il fresato 16-20 mm all'interno di una tina in plastica insieme e viene aggiunta l'acqua di assorbimento un po' per volta, mischiando il tutto e assicurandosi che il fresato si sia bagnato in maniera omogenea. Per evitare che l'acqua aggiunta evapori, nel corso del tempo, il tutto viene chiuso ricorrendo all'utilizzo di teli in plastica.

Il giorno seguente avviene la miscelazione del tutto, ma prima è di fondamentale importanza porzionare il quantitativo in peso di acqua di aggiunta ed emulsione bituminosa [Figura 14].

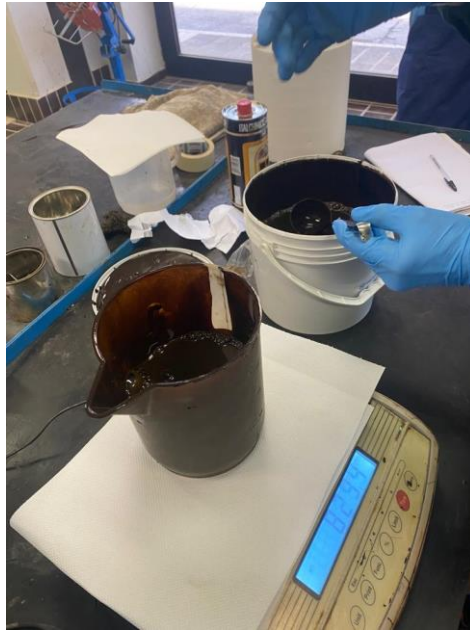


Figura 14 "Dosaggio dell'emulsione bituminosa"

L'emulsione bituminosa viene spesso fornita sotto forma di secchi dove acqua, bitume e additivi molto spesso tendono a separarsi. È quindi opportuno miscelare il composto dal basso verso l'alto prima del dosaggio per utilizzare un'emulsione bituminosa ben omogenea. Inoltre, essendo l'emulsione bituminosa molto viscosa essa tende a rimanere in gran parte attaccata ai bordi del recipiente; quindi, prima del dosaggio di quest'ultima è necessario sporcare di emulsione bituminosa le pareti del contenitore, tarare la bilancia e solo successivamente dosare questo ultimo ingrediente.

Per la miscelazione bisogna seguire una procedura ben definita:

- 1) Si accende la macchina, si imposta il programma di miscelazione con il quale si definisce la temperatura di miscelazione e i tempi di miscelazione;
- 2) Si aggiunge il fresato grosso, il fresato fine, il fresato 16-20, il filler [Figura 15] e le fibre all'interno del miscelatore [Figura 16];



Figura 15 "Fase 2.1 di miscelazione"



Figura 16 "Fase 2.2 di miscelazione"

- 3) Si miscela per 60 secondi;
- 4) Si miscela rapidamente a mano aiutandosi con una paletta al fine di inglobare tutta quella parte fine di materiale che la miscelatrice non è in grado di raggiungere e che

tende a depositarsi sui bordi della camera di miscelazione;

- 5) Si versa metà del cemento porzionato previsto da ricetta distribuendolo in maniera omogenea [Figura 17];



Figura 17 "Fase 5 di miscelazione"

- 6) Si ripetono il p.to 3. e 4.;
- 7) Si aggiunge la parte restante di cemento distribuendolo in maniera omogenea;
- 8) Si ripetono il p.to 3. e 4.;
- 9) Si aggiunge metà dell'acqua di assorbimento cercando di bagnare in maniera omogenea il composto [Figura 18];



Figura 18 "Fase 9 di miscelazione"

10) Si ripetono il p.to 3. e 4. [Figura 19];



Figura 19 "Fase 10 di miscelazione"

11) Si versa tutta l'emulsione bituminosa prevista in maniera uniforme [Figura 20];



Figura 20 "Fase 11 di miscelazione"

12) Si ripetono il p.to 3. e 4.;

13) Si versa la parte restante di acqua di aggiunta in maniera omogenea, oltre che a pulire le pale del miscelatore da eventuali residui come fibre [Figura 21];



Figura 21 "Fase 13 di miscelazione"

14) Si ripete il p.to 3, per poi svuotare l'impasto all'interno di una tina in plastica [Figura 22], coperta da un panno umido al fine di impedire l'evaporazione di acqua. Terminando così la miscelazione;



Figura 22 "Fase 14 di miscelazione"

La compattazione del materiale avviene mediante l'utilizzo di una pressa a taglio giratoria [Figura 23]. Questa è una macchina che è stata inventata alle fine degli anni 50' ed è caratterizzata da:

- un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella;
- un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale;
- una base rotante;
- un sistema di acquisizione e controllo di dati dal quale impostare il numero di rivoluzioni, la velocità di rotazione, la pressione verticale da imprimere e il diametro della fustella. Il software è anche in grado di registrare l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro;



Figura 23 "Pressa giratoria tecnotest"

La compattazione avviene mediante l'applicazione simultanea di una rotazione e di una pressione assiale costante. Per favorire l'addensamento è anche presente un supporto inclinabile di 1.25° . Nel nostro caso la compattazione è avvenuta con i seguenti parametri:

- Numero di rivoluzioni= 120;
- Pressione verticale= 600 kPa;
- Diametro della fustella= 150 mm;

Per la compattazione dell'impasto si procede nel seguente modo:

- 1) Si prende del grasso e si lubrificano tutti i cuscinetti, il pistone, gli snodi e il piano sul quale deve scorrere la fustella per ridurre l'attrito, in modo anche di pesare la tara con la fustella ingrassata ed avere dati più corretti;
- 2) Sul fondo della fustella è presente una piastra infinitamente rigida rimovibile sul quale viene posto un disco di carta-filtro per impedire che il provino aderisca alla piastra stessa;
- 3) Si pesa la fustella unta di grasso e con il disco di carta-filtro con una bilancia elettronica per determinare la massa della tara;
- 4) Si riempie la fustella con il quantitativo di materiale necessario indicato nella ricetta aiutandosi con una paletta [Figura 24];



Figura 24 "Fase 4 di compattazione"

- 5) Metto un altro disco di carta-filtro in sommità della fustella, taro la bilancia e registro il peso lordo della fustella;
- 6) Inserisco la fustella all'interno della pressa giratoria e avvio la prova; quindi, scende il pistone e applica la pressione assiale;
- 7) Una volta applicato il carico verticale si inclina la fustella di un angolo pari a 1.25° avvitando una manopola presente sulla macchina;
- 8) La pressa giratoria inizia a ruotare su se stessa con la velocità e di un numero di giri da noi precedentemente impostato;
- 9) Terminato il numero di rivoluzioni si rimuove metà dell'angolo di inclinazione, vengono completate 3 rivoluzioni, si rimuove la restante parte dell'angolo di inclinazione, fatte le ultime 3 rivoluzioni;
- 10) A questo punto il pistone sale e si rimuove la fustella contenente il provino compattato;
- 11) Si pesa la fustella per poter calcolare la quantità di acqua persa durante la compattazione;
- 12) Per estrarre il provino si ricorre all'utilizzo di un piccolo martinetto ed un sistema di contrasto presente sul piano della pressa giratoria che consente di spingere il provino dal basso verso l'alto mantenendo la fustella ferma [Figura 25];



Figura 25 "Fase 12 di compattazione"

3.2.4. VALUTAZIONE DELLA PERCENTUALE DEI VUOTI

Il comportamento del conglomerato bituminoso dipende significativamente dalla sua composizione volumetriche. Le miscele con le quali si realizzano i conglomerati bituminosi sono costituite prevalentemente da tre componenti:

- Legante;
- Vuoti;
- Inerti;

Di seguito si riportano i metodi utilizzati per il calcolo volumetrico del provino:

- Determinazione della massa volumica apparente;
- Determinazione della massa volumica massima;
- Determinazione del volume dei vuoti;

La massa volumica apparente è apparente la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di provino ad una temperatura di prova nota. In questa analisi sperimentale la massa volumica apparente ρ_b del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando la procedura D (procedura geometrica) che prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco (m_1). La massa volumica geometrica ($\rho_{b,geom}$) per provini cilindrici si calcola come segue:

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

dove:

- ρ_b = massa volumica apparente del provino in kg/m³;
- m_1 = massa del provino asciutto in g (decurtata del contenuto di acqua residuo presente in fase di rottura del provino);
- h = altezza del provino in mm;
- d = diametro del provino in mm;

La massa volumica massima è la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. In questa analisi sperimentale la massa volumica massima ρ_m 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;

Il volume dei vuoti residui è determinato in accordo a quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8. Il volume dei vuoti residui dei provini compattati si ricava utilizzando la massa volumica massima e la massa volumica apparente mediante la seguente formula:

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

3.2.5. ITSM

Questa è una prova utilizzata per la misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta mediante un'apparecchiatura chiamata NAT (Nottingham Asphalt Tester). La prova consiste nell'applicare un carico di compressione in una direzione del provino e misurare la deformazione mediante trasduttori nella direzione ortogonale a quella di applicazione del

carico. La misurazione del modulo di rigidezza mediante l'impiego di questa macchina avviene quindi con una prova ripetuta a trazione indiretta. Per effettuare tale prova, nel corso di tale sperimentazione, sono state seguite le indicazioni dettate dalla normativa UNI EN 12697-26 secondo la modalità a deformazione controllata. La prova a trazione indiretta per la misurazione del modulo di rigidezza viene effettuata pertanto su due diametri per ciascun provino (con un angolo compreso tra le due direzioni di $90^\circ \pm 2^\circ$). L'apparecchiatura è munita di un software integrato attraverso il quale è possibile impostare tutte le variabili della prova ossia:

- Carico di prova;
- Deformazione di target ($2 \mu\text{m}$);
- Rise time (tempo di picco);
- Temperatura di prova;
- Coefficiente di Poisson;

Il controllo di tali grandezze avviene nella fase di condizionamento dove mediante un sistema di gestione e l'applicazione di "impulsi di condizionamento" è possibile effettuare la taratura di tali parametri, oltre a ad assetare il carico sulla superficie del campione. Per tale sperimentazione, date le condizioni di prova ed il controllo dei parametri, è possibile validare l'ipotesi di materiale omogeneo e isotropo. Ciò sta a significare che il modulo di rigidezza, ricavato dalla prova di trazione indiretta ripetuta, è funzione di:

- Temperatura di prova;
- Geometria del provino;
- Rise time;
- Coefficiente di Poisson;
- Deformazione orizzontale;

Per il calcolo delle sollecitazioni medie e massime nelle due direzioni di trazione e compressione si utilizzano le seguenti espressioni:

- $\sigma_{x,max} = 2 \cdot P / \pi \cdot d \cdot t$
- $\sigma_{y,max} = -6 \cdot P / \pi \cdot d \cdot t$
- $\sigma_{x,media} = 0.273 \cdot P / d \cdot t$
- $\sigma_{x,max} = -P / d \cdot t$

Dove:

- P= carico applicato;
- d= diametro del campione;
- t= spessore del campione;

Il modulo di rigidezza elastica può essere rappresentato in termini di deformazione. Dato un campione soggetto ad un determinato stato tensionale biassiale la deformazione orizzontale ε_x è la seguente:

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

Dove:

- E è il modulo elastico del materiale con il quale è realizzato il campione;
- N è il coefficiente di Poisson;

La deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione pertanto si ha che:

$$\Delta = 0.273 \cdot P/E \cdot t + \nu \cdot P/E \cdot t$$

Nota la deformazione orizzontale dei campioni, il modulo elastico del materiale si ricava con la seguente formula:

$$E = P \cdot (0.273 + \nu) / \Delta \cdot t$$

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

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

dove:

- E'= modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- k= rapporto tra le aree;
- E= modulo di rigidezza in Mpa;

Al fine di accertare che la prova sia correttamente eseguita, si devono ottenere curve di deformazione e di carico il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $5,0 \pm 0,2$ μm (nel caso di conglomerato bituminoso standard).

Le variabili che influenzano maggiormente la determinazione del modulo sono:

- Temperatura: per far sì che la formula per il calcolo del modulo E sia impiegabile, occorre che quest'ultimo abbia, sia a compressione che a trazione, lo stesso valore. Questa regola è lecita solo per temperature sotto i 25°C tanto che in questa analisi sperimentale le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di 20°C;
- Numero di impulsi per il condizionamento: si è già visto come sia possibile effettuare una taratura dei vari parametri durante l'applicazione di impulsi di condizionamento. È necessario scegliere attentamente il numero di impulsi per il condizionamento iniziale al fine di ottenere valori di rigidità affidabili. Al ridurre del numero di impulsi applicati si ottengono tempi di prova ridotti, ma risultati meno attendibili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto che questi non sono sufficienti. Pertanto, nella presente indagine sperimentale, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento;
- Deformazione orizzontale imposta: le proprietà del conglomerato bituminoso dipendono significativamente dal livello di deformazione imposta durante la prova a causa del suo comportamento non lineare. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 2 μm ;
- Tempo di picco: a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In particolare, il rise-time (tempo di picco), in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo. Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidità del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale). La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

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

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

Il Nottingham Asphalt Tester al fine di effettuare prove ad una temperatura prefissata, costante e controllata è posto all'interno di una camera climatica che consente il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di prova di 20°C. All'interno della camera climatica è presente un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina, attraverso il quale avviene la misurazione. Il NAT è composto da una cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 kN e da un pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino. Tale cella di carico è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati. La misurazione della deformazione nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico avviene tramite dei trasduttori che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione ogni minimo spostamento. Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti illustrati in Figura 26. In tale illustrazione si possono notare i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori (1), il telaio al cui interno va posto il provino da testare (3), i morsetti di fissaggio che collegano il provino al telaio (4), il canale che permette il centramento del provino (5), le barre che permettono di posizionare i trasduttori a metà del provino (6), le viti che tengono in posizioni tali barre (7) ed infine la leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori (8).

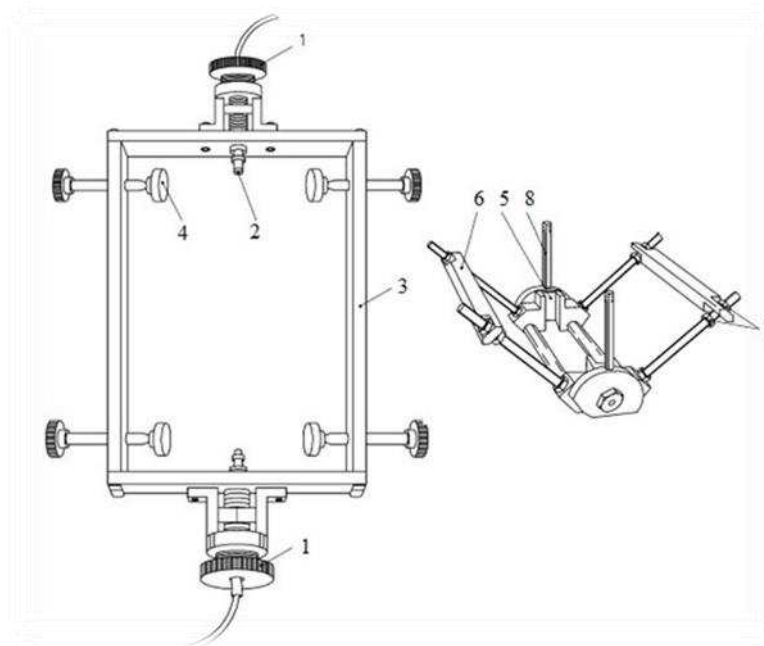



Figura 26 "Strumenti utilizzati per il sostegno del provino nella prova ITSM"

Dato che uno dei dati di input per la prova sono le caratteristiche geometriche del provino sono state misurate con apposito calibro i diametri e le altezze dei provini. Per tale dato, si è misurata l'altezza su quattro punti, e si è presa come altezza del provino da testare la media dei quattro valori misurati. In accordo alla norma UNI EN 12697-26, i provini da testare sono stati condizionati termicamente alla temperatura di prova desiderata, grazie all'utilizzo di una camera climatica apposita per un tempo sufficiente a raggiungere la giusta temperatura anche all'interno del provino con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4 °C. Di seguito si illustra nel dettaglio come è stata effettuata la misurazione del modulo a trazione indiretta:

- 1) Si accende la macchina ed il computer e si apre il software apposito. Il primo passo è quello di inserire la denominazione del provino e tutti i dati di input necessari per effettuare la prova [Figura 27]



The screenshot shows a software window titled "itsm3" with a light beige background. It contains seven input fields, each with a label and a numerical value in a blue box. The fields are: "Test temperature (°C) = 20.0", "Specimen diameter (mm) = 100.0", "Specimen thickness (mm) = 68.7", "Poisson's ratio = 0.35", "Target rise-time (ms) = 124", "Target horizontal deformation (microns) = 3", and "Number of conditioning pulses = 10". Each field has small up and down arrow icons to its right. At the bottom left, it says "Cooper Research Technology Limited". At the bottom right, there are two buttons: "Exit" and "Continue".

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

Figura 27 "Schermata iniziale per dati di input prova ITSM"

I parametri da inserire sono i seguenti:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova, ossia 20°C;

- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test, circa 150 mm;
 - Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test ottenuta come media delle 4 altezze precedentemente misurate;
 - 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, in questo caso 124 ms;
 - Target horizontal Deformation [μm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino, ossia 3 μm ;
 - Number of Conditioning Pulses: numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 3 μm ossia 10 impulsi;
- 2) Inseriti i dati con un clic del mouse su Continue si passa alla schermata successiva, dove vanno inserite le informazioni riguardanti la data di effettuazione del test, l'addetto che lo esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. [Figura 28]

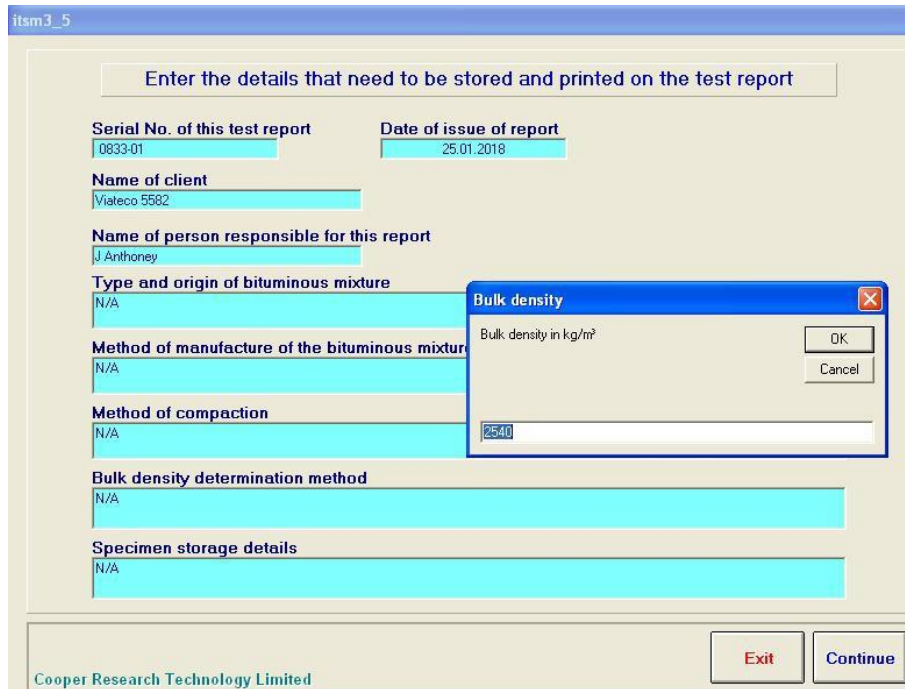


Figura 28 "Schermata software per informazioni su giorno di prova, metodo di produzione del campione ecc.. per prova ITSM"

- 3) Fatto ciò, si passa alla schermata successiva tramite un clic sempre su Continue dove è possibile controllare il pistone pneumatico [Figura 29]; infatti, una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico. Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante *Make Contact*. Infatti, il pistone si porta a contatto applicando sul provino una forza di pre-carico pari a circa 30 N.

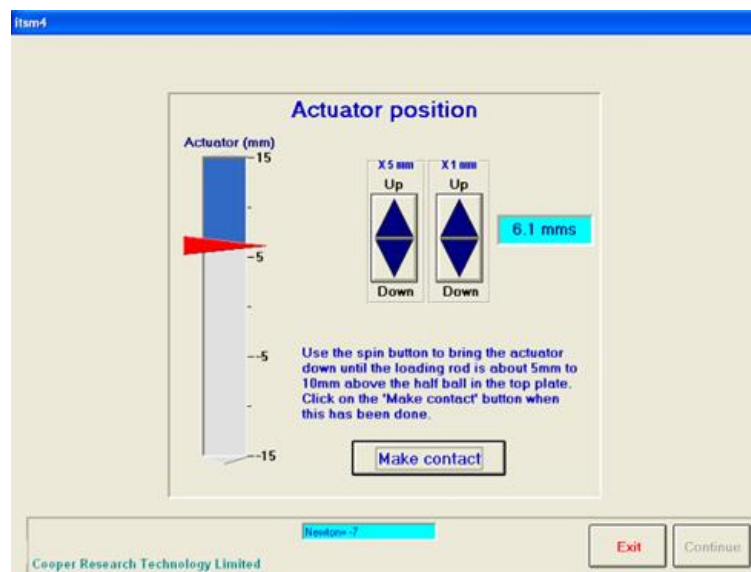


Figura 29 "Schermata software per il controllo del pistone nella prova ITSM"

- 4) Successivamente viene visualizzata una schermata con la quale è possibile registrare e mettere in posizione i trasduttori [Figure 1]. Essi, infatti, vanno regolati finché i due indicatori bianchi non diventano rossi, a quel punto significa che i trasduttori sono in grado di misurare correttamente la deformazione. Se i trasduttori non fossero così regolati la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino, questo porta ad una errata applicazione del carico, in quanto si avrebbe un'auto-calibrazione errata e quindi il risultato del test verrebbe falsato.

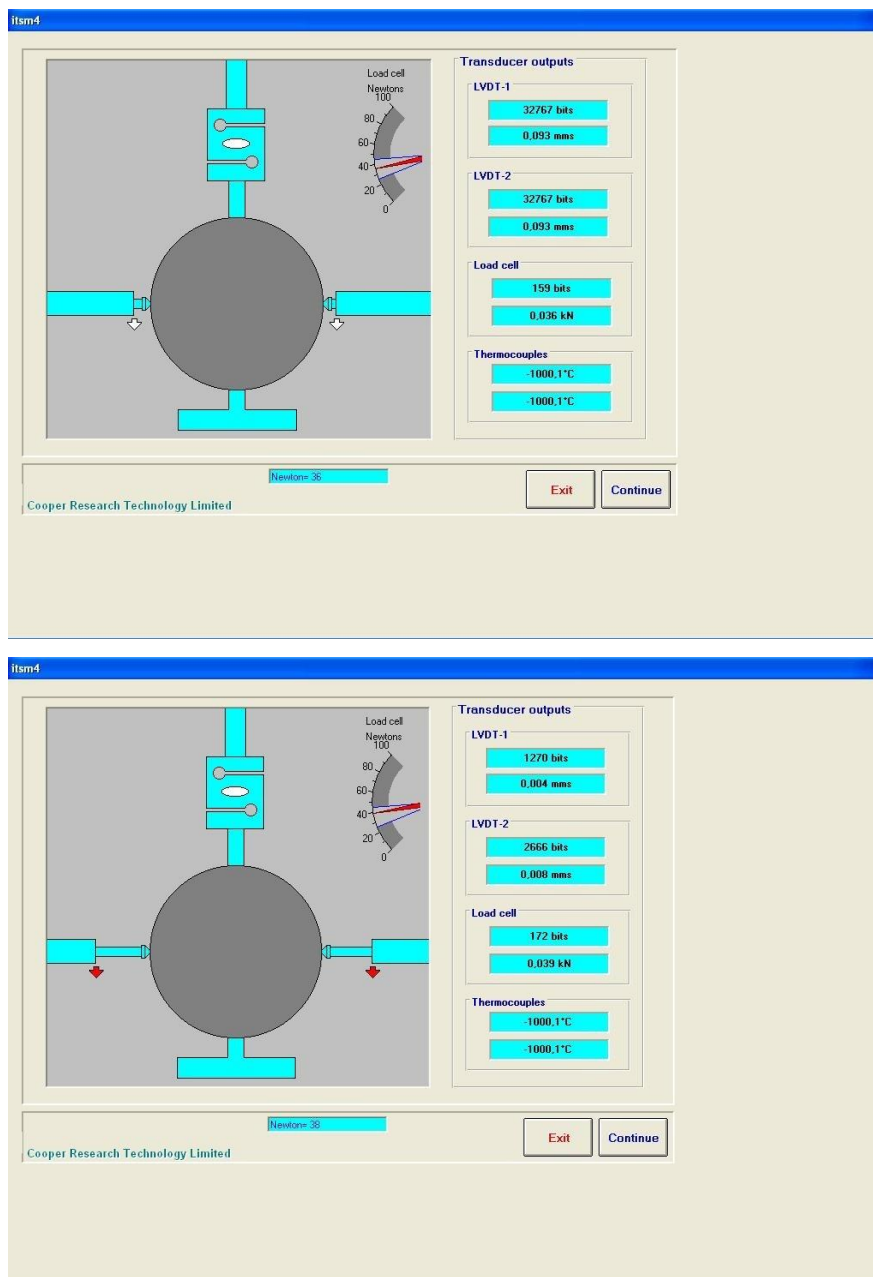


Figure 1 "Schermate software la registrazione dei trasduttori nella prova ITS4"

- 5) Prima di avviare la prova è opportuno controllare la temperatura della camera climatica al cui interno è posizionata tutta l'apparecchiatura con il provino montato su essa. In particolare, tale temperatura non dovrà essere differente da quella di prova di un valore ± 0.5 °C. Una volta sicuri che anche la temperatura è corretta, si prosegue il test cliccando sul tasto Continue. A questo punto si passa alla schermata seguente dove vengono visualizzati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di pre-carico [Figura 30].

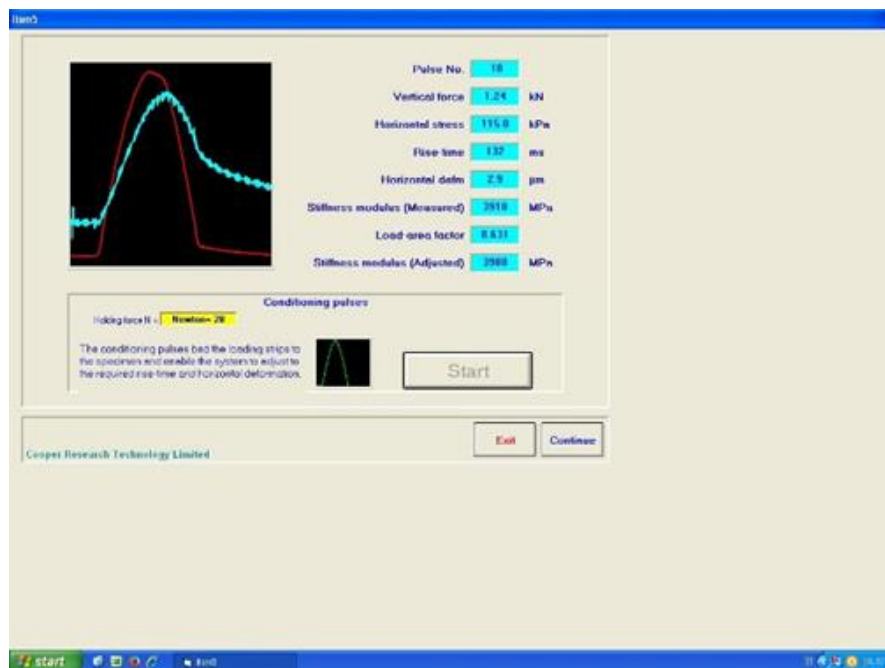


Figura 30 "Schermata software dei risultati di pre-carico nella prova ITSM"

- 6) Infine, si visualizzano i risultati. Nella schermata finale si visualizzano i 5 impulsi di prova e ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro [Figura 31].



Figura 31 "Schermata software dei risultati della prova ITSM"

- 7) Infine, si ruota il provino di un angolo pari a $(90^\circ \pm 10^\circ)$ ed in seguito si ripete il test con i passaggi appena descritti. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%. Il modulo definitivo si ottiene come media di quelli misurati sui due diametri.

3.2.6. ITS

La prova di rottura a trazione indiretta è la prova che viene impiegata per determinare l' ITS (Indirect Tensile Strength) ovvero la massima tensione di trazione che può essere sostenuta da un campione cilindrico, in ottemperanza alla normativa UNI EN 12697-23. La misurazione dell'ITS è cruciale per valutare la qualità e l'accettabilità delle miscele.

La prova di trazione indiretta viene effettuata ad una temperatura di 25°C , per tale motivazione i campioni vengono preconditionati in una camera climatica a 25°C per almeno quattro ore, in modo che tutto il provino, anche le parti più interne, risultino avere la stessa temperatura. Per effettuare la prova si utilizza un'apparecchiatura costituita un sistema di carico caratterizzato da due piastre parallele infinitamente rigide. Le sollecitazioni sono applicate al provino mediante due listelli di larghezza 15 ± 2 mm, spessore 4 ± 1 mm e lunghezza maggiore della zona di contatto con il provino. Il campione stesso viene posizionato in modo che il suo asse sia orizzontale, con l'asse della barretta superiore parallelo a quello della barretta inferiore, e entrambi giacenti nello stesso piano verticale dell'asse del campione

[Figura 32].



Figura 32 "Prova ITS"

La prova avviene facendo abbassare la testa di carico con una velocità costante di 50 ± 2 mm/min [Figura 33]. L'apparecchiatura è in grado di rilevare:

- la deformazione risultante dalla trazione e dalla compressione del campione durante l'applicazione dello stress, mediante estensimetri;
- la forza massima esercitata in fase di compressione fino alla rottura del materiale, mediante la presenza di una cella di carico;



Figura 33 "Rottura del provino in seguito alla prova ITS"

L'apparecchiatura è caratterizzata anche dalla presenza di un software a cui bisogna fornire le seguenti informazioni geometriche del provino e parametri di prova:

- diametro del provino;
- altezza del provino;
- velocità di avanzamento della piastra;
- carico di fine prova;

A sua volta il software fornisce i seguenti dati di output [Figura 34]:

- la curva carico-corsa;
- il carico di rottura a compressione (P_{max});
- la deformazione a compressione e a trazione;

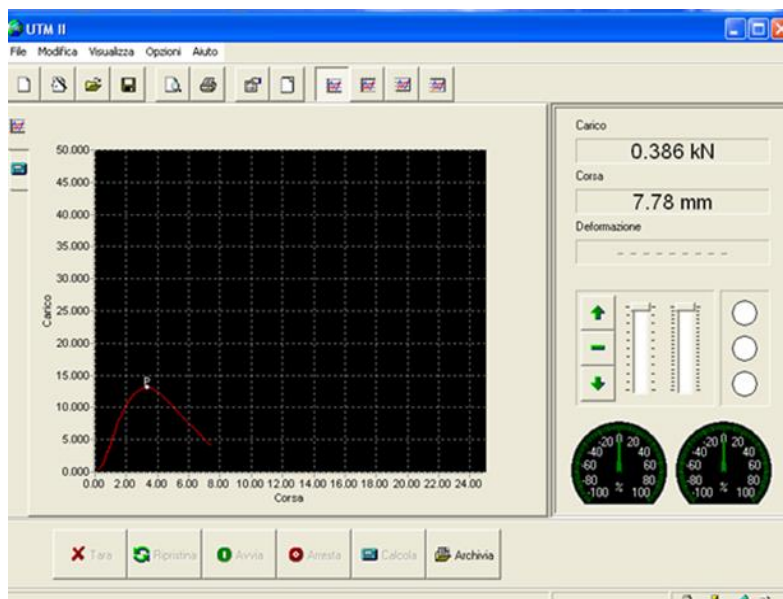


Figura 34 "Risultati di output della prova ITS"

L'ITS si ottiene applicando la seguente formula:

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

dove:

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

Dalla curva di carico-corsa è possibile ricavare il CTI (coefficiente di trazione indiretta). Questo è un parametro indicante la pendenza della retta secante la curva, ossia quella retta partente dall'origine e che incrocia il punto massimo della curva. La pendenza di tale retta nel diagramma forza-deformazione definisce la rigidità (modulo) del provino. Il problema è che i risultati ottenuti necessitano di una rettifica in quanto durante la prova (ITS) la piastra di carico non incontra subito il provino bensì trova uno spazio vuoto tra la barretta superiore ed il provino stesso. Tale spazio influenza il parametro del CTI andando a sottostimare la rigidità ottenuta. Per tale motivo risulta necessario, mediante l'utilizzo di fogli Excel, correggere l'errore generato ottenendo il valore corretto con la formula:

$$CTI = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{p}{\delta} \cdot 10$$

Dove:

- p = massimo valore di forza "corretto";

- δ = massimo valore di spostamento “corretto”;

Il CTindex invece è un parametro calcolato di seguito al CTI, dipendente da altezza e spessore del provino, oltre che dalla forma del diagramma F- δ . Questo parametro rappresenta l’energia sottesa alla curva di rottura derivante dalla prova ITS ed è individuato dalla formula:

$$CT_{index} = t/62 x^{G_f/m_{75}} x^{(l_{75}/D)}$$

3.2.7. PROVA DI MODULO COMPLESSO A COMPRESSIONE

La prova di modulo complesso a compressione è una prova dinamica in regime oscillatorio, dove viene applicato un carico di compressione assiale con forzante sinusoidale. Questa prova ci consente di misurare il modulo complesso $|E^*|$ e l’angolo di fase ϕ sottoponendo il provino a diverse frequenze di carico e a diverse temperature. Per tale motivo la prova avviene all’interno di una camera climatica. L’apparecchiatura è equipaggiata con una centralina attraverso la quale è possibile gestire e l’acquisire in tempo reale i dati e i risultati di prova, gestire l’alimentatore idraulico che movimentata i vari pistoni e le impostazioni di prova del macchinario principale. Attraverso il software UTS 006 è possibile impostare i parametri di prova. Per effettuare la prova vengono utilizzati i seguenti accessori:

- Testa di carico metallica di forma cilindrica con una cavità semi-sferica al centro per favorire il contatto con la testa del pistone di carico;
- Tre trasduttori di spostamento induttivo LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), presenti in tre colori differenti (nero, verde, blu), per la misurazione di spostamenti assiali subiti dal provino. Vengono applicati a lato del provino grazie all’ausilio di riscontri e Xmen;
- Sei supporti, detti Xmen, che vengono ancorati ai riscontri metallici esagonali mediante un meccanismo a molla. Questi consentono il corretto posizionamento assiale dei trasduttori LVDT prima della prova;
- Sei riscontri metallici di base esagonale, necessari per l’ancoraggio degli Xmen al provino. Questi riscontri sono fissati al provino con una colla bicomponente ed una apparecchiatura apposita che consente il fissaggio con una disposizione ben precisa;

Per effettuare la prova è necessario effettuare un ridimensionamento geometrico tramite l’utilizzo di macchina carotatrice, sega e spianamento delle facce del provino. Si procede nel

seguito modo:

- il provino ottenuto dall'estrazione con martinetto idraulico della pressa giratoria viene quindi carotato e tagliato. Per fare ciò si impiega una macchina carotatrice che ci consente di ottenere il nucleo centrale del provino, maggiormente rappresentativo delle reali condizioni di compattazione. Inoltre, vengono anche tagliate le estremità superiori e inferiori della carota, mediante l'utilizzo di una sega, al fine di ottenere le corrette dimensioni per la prova;
- Dato che la riprofilatura avviene sotto getto d'acqua al fine di ridurre la produzione di polveri e il surriscaldamento del materiale, è necessario asciugare il provino. Per questo motivo risulta opportuno mettere il campione in camera climatica per una omogenea asciugatura. A questo punto il provino asciutto viene pesato e vengono misurate con un calibro tre altezze ed il diametro;
- La spianatura è la fase successiva e consiste nel regolarizzare le imperfezioni della superficie delle basi del provino causate dal taglio delle estremità, che altrimenti causerebbero problemi al provino durante la prova sia in termini di stabilità che di risultati. Quindi si posiziona una base metallica, avente un lato liscio rivolto verso l'alto, e si mette con un foglio di carta trasparente al di sopra. Si distribuisce poi la resina epossidica sulla base del provino con l'ausilio di una spatolina cercando stendere il tutto in modo omogeneo. Successivamente si ruota il provino e lo si poggia con il lato su cui è stata applicata la resina a contatto diretto con il foglio di carta lucida e si applica, superiormente al provino, una base metallica che funge da peso. Attraverso una livella ci si accerta che in due direzioni ortogonali il provino sia in bolla. Nel caso in cui non lo sia si provvede a rettificare il tutto facendo pressione in testa al provino dal lato in cui si vuole far spostare la bolla. Si rimuove la resina fuoriuscita dal bordo della base inferiore a causa della compressione indotta e si lascia la base di carico sulla testa del provino per circa un'ora. Una volta solidificata la resina epossidica si solleva il provino e si rimuove la carta trasparente ottenendo così una superficie perfettamente liscia. Poi si ripete la procedura appena illustrata per la seconda faccia e per tutti i provini da testare. Terminata la spianatura di entrambe le facce si misurano nuovamente le altezze che saranno leggermente variate a causa della resina applicata.

Prima di effettuare la prova è necessario incollare i riscontri con resina epossidica che servono

da supporto per il corretto posizionamento dei sostegni, chiamati Xmen, ai quali verranno ancorati i trasduttori. Per fare ciò si posizionano i sei riscontri sui braccetti di una specifica apparecchiatura di laboratorio per il corretto distanziamento e posizionamento. Questi trasduttori sono collocati a circa 135° tra di loro nel piano dove è di fondamentale importanza collocare i riscontri alla medesima distanza da entrambe le basi. È anche molto importante accertarsi che questi siano incollati in corrispondenza di una superficie del provino regolare e priva di fori. Anche in questo caso l'incollaggio avviene tramite una colla epossidica bicomponente che viene applicata su una base di ogni riscontro e grazie all'azione dell'apparecchiatura che tiene i braccetti, e di conseguenza i riscontri, bloccati durante la fase di presa della colla.

I vari parametri di prova sono i seguenti:

- Temperature= ogni singolo provino viene sottoposto a 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, per ogni temperatura di prova;
- Deformazione assiale imposta= in particolare viene 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.

La sollecitazione assiale di compressione è controllata e fornita dal pistone di carico e da una cella di carico ad essa incorporata, mentre la deformazione assiale è ottenuta dalla 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. Di seguito viene illustrato il funzionamento del software *UTS 006 - AMPT Dynamic Modulus Test*:

- 1) Si avvia il file noto come Template per rigidità intermedia;
- 2) Si inizializza la nuova configurazione mediante il comando *New* e nella sezione *Setup and Control* si immettono i parametri di prova [Figura 35]:
 - Nome provino;

- Altezza provino;
- Diametro provino;
- Stima del modulo complesso iniziale;
- Frequenze di carico;
- 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 ;

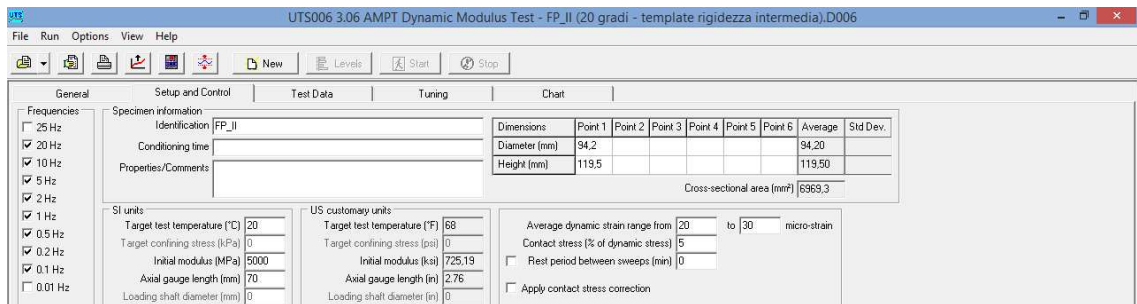


Figura 35 "Schermata software per inserimento dati di input della prova di Modulo Complesso a Compressione"

3) Per la gestione dell'alimentatore idraulico, l'accensione e lo spegnimento dei motori e i movimenti verticali del pistone e della traversa si utilizza il pulsante *Virtual Pendant* [Figura 36]. Pertanto, utilizzo tale interfaccia per posizionare la traversa alla giusta altezza in modo tale che il pistone sia a metà del suo abbassamento massimo al momento del contatto con il provino;

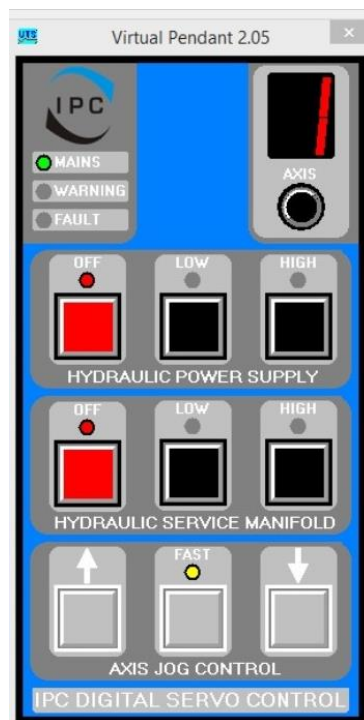


Figura 36 "Interfaccia per controllo traversa e pistone della prova di Modulo Complesso a Compressione"

- 4) Posiziono il provino sulla base della traversa. Successivamente, si posiziona sulla testa del provino la base metallica cilindrica con l'incavo circolare in corrispondenza del pistone.
- 5) Si montano i tre *trasduttori LVDT* (nero, verde, blu) con le rispettive punte metalliche negli alloggiamenti centrali presenti negli *Xmen* e si controlla che questi siano compressi di circa la metà della loro corsa. In caso contrario è necessario tarare la corsa di questi trasduttori attraverso una ghiera e una vite presenti in corrispondenza della loro punta. La corsa dei trasduttori può essere visualizzata attraverso la finestra *Transducer Levels Display* [Figura 37]. Fatto ciò, si impone il comando *set zero offset* per rimuovere, a livello software, eventuali piccole imprecisioni.

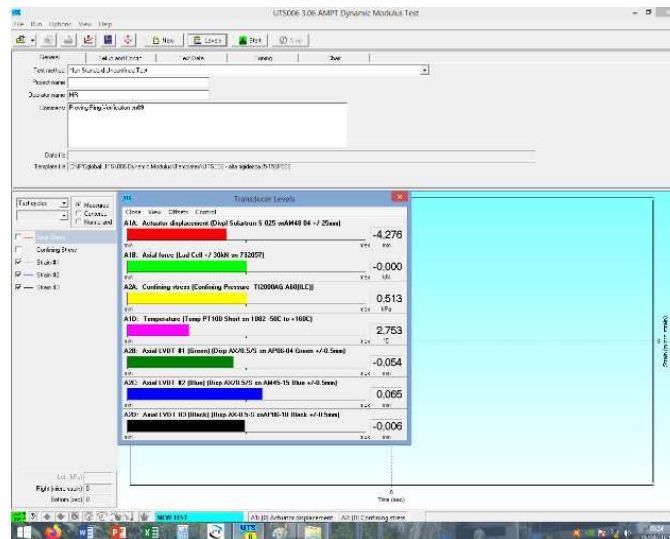


Figura 37 "Finestra *Transducer Levels Display* del software per prova di Modulo Complesso a Compressione"

- 6) Si procede alla fase di *Tuning*, detto anche centraggio del provino, in cui se ne verifica il corretto posizionamento [Figura 38]. Questa fase viene effettuata ad una temperatura di 20 °C, ad una frequenza di carico di 1 Hz e con una deformazione imposta di 30 micro-strain; ciò viene fatto per evitare danneggiamenti del provino. Si abbassa quindi il pistone mediante il pulsante *Ram* fino a quasi raggiungere la piastra di contatto e si avvia il *Tuning* con il pulsante *Haversine*. Si ripete la procedura del *Tuning* spostando manualmente il provino finché non si riscontrano dei valori ottimali in termini di uniformità di deformazione, di angolo e forma delle onde di deformazione.

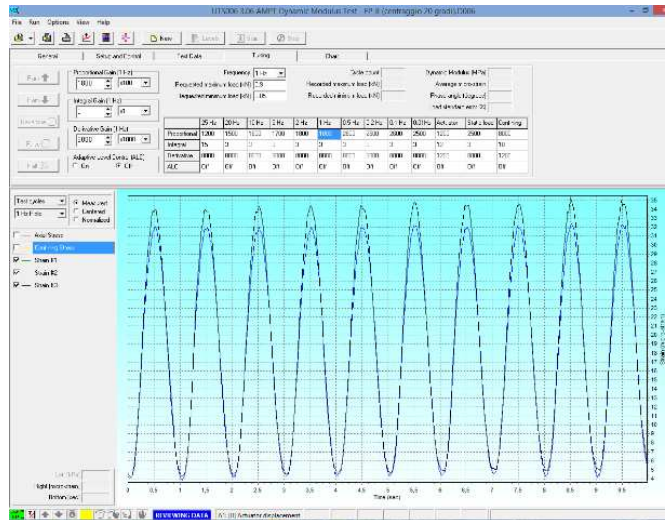


Figura 38 "Risultati di output in seguito al centraggio del provino per la prova di Modulo Complesso a Compressione"

- 7) Terminata la fase di centraggio il provino non viene più toccato e viene messo a condizionare alla temperatura di prova.
- 8) Prima di avviare la prova nella sezione *Setup and Control* [Figura 39] si immettono i parametri necessari e si avvia la prova mediante il pulsante *Start*;

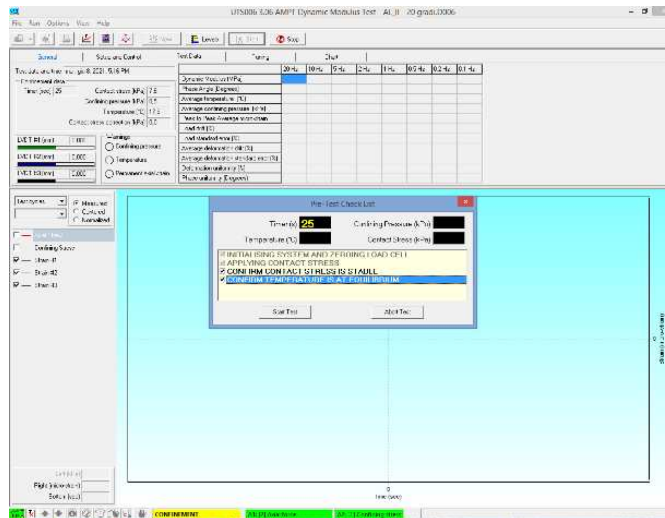


Figura 39 "Schermata software per avvio della prova di Modulo Complesso a Compressione"

- 9) Nella sezione *Test Data*, mostrata nella Figura 40, si osservano in tempo reale i valori dei risultati della prova e l'andamento delle curve dei 3 trasduttori. Per ciascuna temperatura di prova si osservano l'andamento dei valori del modulo dinamico e dell'angolo di fase al variare delle frequenze di carico indagate. È opportuno verificare, per garantire la corretta esecuzione della prova, che la deformation uniformity sia minore del 20%, la phase uniformity sia minore di 5° e che l'average deformation drift sia minore di 0.

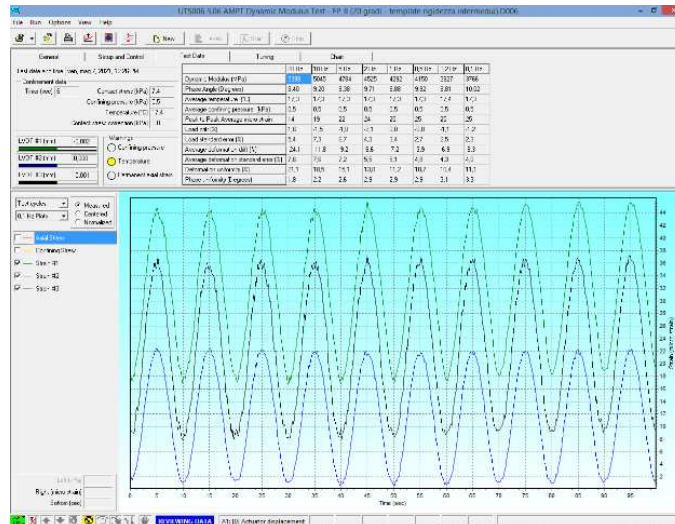


Figura 40 "Risultati di output della prova di Modulo Complesso a Compressione"

10) A La prova è completata quindi si procede alla temperatura di test successiva ripetendo il procedimento senza eseguire nuovamente il centraggio del provino.

I dati ottenuti vengono rappresentati in curve isoterme per poi essere traslati in un'unica curva, detta curva maestra, tramite fattori di traslazione (*shift factors*) e interpolati con l'ausilio di un modello analitico. Si ottengono così tutti i parametri dinamici fondamentali per descrivere il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso: il modulo dinamico, il modulo complesso, la componente elastica e viscosa del modulo complesso e l'angolo di fase.

La *Curva Maestra* o *Master Curve* è una rappresentazione grafica del comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso o del legante bituminoso mediante una curva ottenuta dall'applicazione del principio di sovrapposizione tempo-temperatura. Questa curva maestra rappresenta per una prefissata temperatura, detta temperatura di riferimento T_{rif} , l'andamento di una grandezza dinamica, modulo dinamico $|E^*|$ o angolo di fase φ , in funzione della frequenza di carico ridotta f_r .

Il conglomerato bituminoso è un materiale a comportamento viscoelastico, ovvero termo e tempo dipendente. Questo però permette di sfruttare il *principio di sovrapposizione tempo-temperatura* o *time-temperature superposition principle (TTSP)*, 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 TTS sono definiti *termoreologicamente semplici*.

Nello specifico, il principio di TTS 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 $T_{rif} = T_0$:

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

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

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

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.

Nella presente indagine sperimentale, 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:

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

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 si riferiscono alle quattro temperature di prova T (5 °C, 20 °C, 35°C e 50 °C): a_5 , a_{20} , a_{35} e a_{50} .

Nella fase analitica della presente sperimentazione, per regolarizzare e interpolare i risultati sperimentali misurati in ogni singola prova dinamica di modulo complesso eseguita, ci si avvale

del modello generale 2S2P1D.

Il modello 2S2P1D [Figura 41] prende il proprio nome dall'acronimo dei termini inglesi degli elementi meccanici principali che lo costituiscono:

- 2S corrisponde a 2 springs, cioè 2 molle ($E_\infty - E_0$ 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)

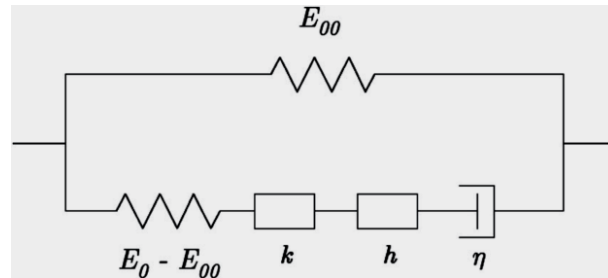


Figura 41 "Schema modello 2S2P1D"

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 $\omega \rightarrow 0$;
- E_∞ è il modulo vetroso relativo a $\omega \rightarrow \infty$;
- 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:

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

dove:

- a_T è il fattore di traslazione orizzontale alla temperatura T ricavato con l'equazione empirica di WLF;
- τ_0 è il tempo caratteristico alla temperatura di riferimento $T_{rif} = T_0 = 20^\circ\text{C}$;

Quindi, il *modello 2S2P1D* permette di rappresentare il comportamento viscoelastico lineare del materiale con un modello meccanico fisico mediante la determinazione dei suoi parametri, ottenibile sperimentalmente.

Considerando il principio di TTS e impiegando il modello 2S2P1D, è possibile rappresentare graficamente i risultati sperimentali ottenuti dalle prove dinamiche in regime oscillatorio, identificando così il comportamento viscoelastico lineare del conglomerato bituminoso; si distinguono le seguenti possibili rappresentazioni grafiche:

- *Curva Maestra o Master Curve* [Figure 2]:

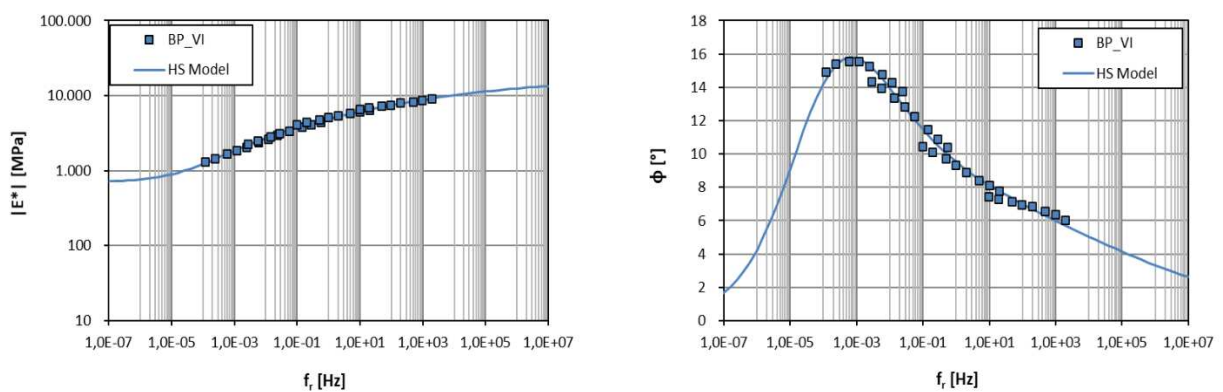


Figure 24 "Master Curve"

- *Piano di Black* [Figura 42]: in questo piano si riporta l'andamento del modulo dinamico $|E^*|$ in funzione dell'angolo di fase ϕ :

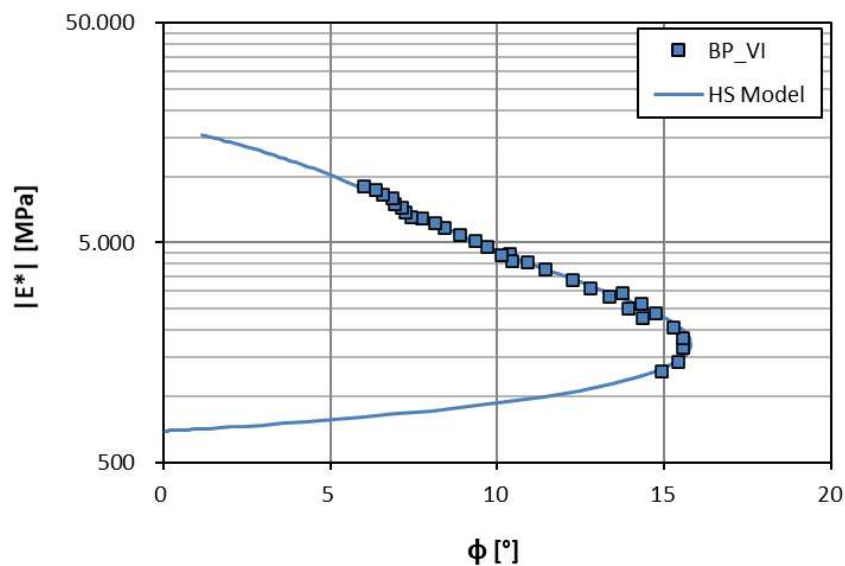


Figura 42 "Diagramma di Black"

- *Piano di Cole-Cole* [Figura 43]: 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.

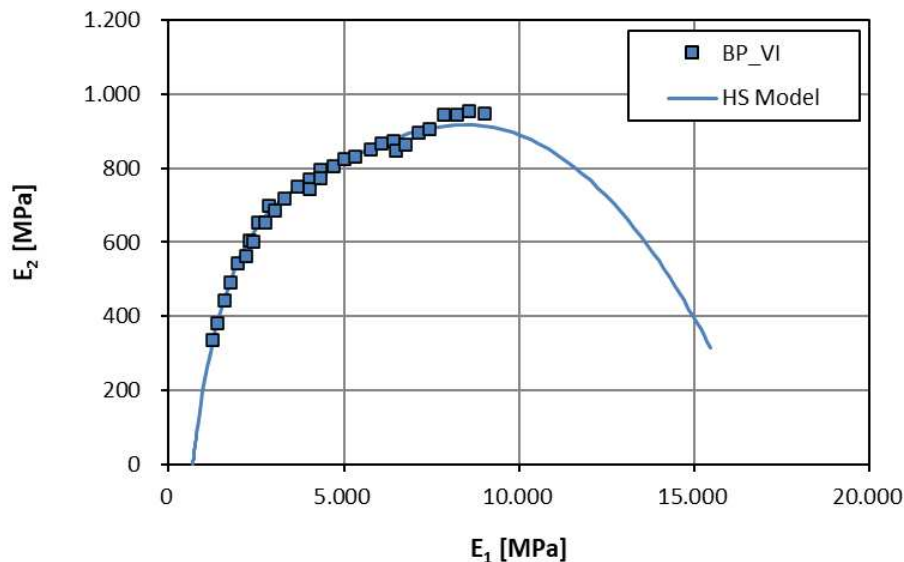


Figura 43 "Grafico di Cole-Cole"

3.2.8. PROVA DI FATICA A TRAZIONE INDIRECTA

La prova a fatica è una prova che viene effettuata su provini cilindrici ricorrendo all'ausilio del Nottingham Asphalt Tester (NAT). Prima di effettuare la prova, è necessario condizionare il provino per almeno 4 ore in camera termostatica alla temperatura di 20 °C.

Questa è una prova in cui si applica sostanzialmente un carico ciclico di entità molto inferiore rispetto alla resistenza del materiale, ma ripetuto per un numero di volte così elevato da portarlo a rottura. L'apparecchiatura utilizzata per questa prova restituisce un grafico dove è riportato sull'asse delle ascisse il numero di cicli e sull'asse delle ordinate la deformazione registrata. Per ogni prova quindi avremo il numero di cicli di rottura, la tensione orizzontale applicata e la deformazione iniziale registrata dopo 115 cicli. Con questi dati possiamo costruire un grafico deformazione iniziale-cicli di rottura e un grafico tensione orizzontale-cicli di rottura, inserendo per ogni prova il punto di rottura e tracciando una retta che interpoli al meglio i risultati. Al fine di ottenere una buona interpolazione e attendibilità è importante effettuare prove di breve media e lunga durata in modo da avere punti distribuiti in modo uniforme lungo tutto il grafico. L'interpolazione dei dati ha come obiettivo quello di ottenere la legge di fatica. I provini vengono sottoposti ad una prova ITSM che misura la rigidità al fine

di stimare la corretta tensione orizzontale: 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 consiglia di avere almeno due prove per ogni misurazione effettuata ad un certo livello deformativo. In questo modo quindi si ottiene la retta o legge di fatica del materiale, che permetterà di confrontare il comportamento di materiali diversi, come nel caso del presente lavoro sperimentale, oppure di progettare la pavimentazione stradale. Per la prova a fatica l'apparecchiatura utilizzata è il NAT in cui, a differenza della prova ITSM, vengono utilizzati tipologie differenti di accessori quali il castelletto di supporto del provino e i trasduttori. Di seguito si descrive la procedura da seguire per effettuare la prova di fatica a trazione indiretta:

- 1) Prima di sottoporre i provini alla prova a fatica è necessario che ad essi vengano incollati due lamierini detti "barrette" che fungono da supporto per il posizionamento dei trasduttori, al fine di misurare la deformazione. Questi lamierini devono essere disposti in punti opposti lungo la direzione in cui si è misurata la rigidità del provino con l'ITSM. L'incollaggio avviene ricorrendo all'utilizzo di resina epossidica e di un castelletto apposito dotato di piccole molle che consente di mantenere le barrette aderenti al provino con resina. Ovviamente questa procedura viene effettuata prima di mettere a condizionare i provini in camera termostatica per 4 ore in modo da far maturare la resina nel tempo di condizionamento ed ottimizzare i tempi.
- 2) Si posiziona il provino nel castelletto apposito presente all'interno del macchinario in modo da avere le barrette ortogonali alla direzione di carico. Il provino viene tenuto fermo abbassando la barra di carico su cui andrà ad agire il pistone.
- 3) Posizionato il provino nel castelletto si avvia il software, visualizzando la schermata mostrata in Figura 44 e si preme "OK" lasciando le impostazioni di default:

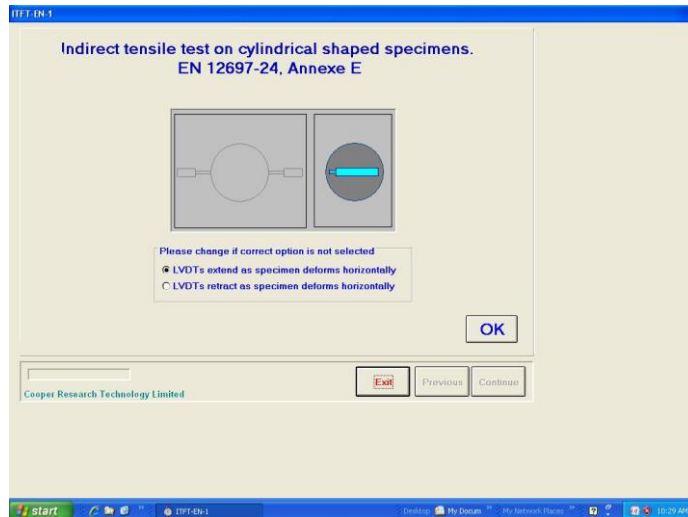


Figura 44 "Schermata software iniziale della prova ITFT"

- 4) Successivamente si inserisce il nome del provino che gli è stato assegnato seguendo una determinata nomenclatura [Figura 45]:

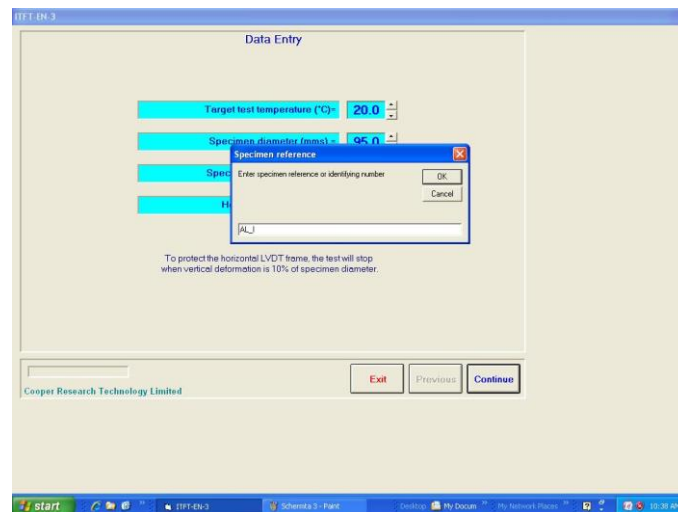


Figura 45 "Schermata software per inserimento nome provino per prova ITFT"

- 5) Si inseriscono tutti i parametri di prova [Figura 46], ossia:
- Temperatura di prova, in questo caso di 20°C mantenuta costante della camera climatica in cui è posizionato il NAT;
 - Diametro del provino, misurato prima di effettuare la prova ITSM;
 - Altezza del provino, misurata prima di effettuare la prova ITSM;
 - Tensione orizzontale imposta, scelta in funzione del modulo di rigidezza;

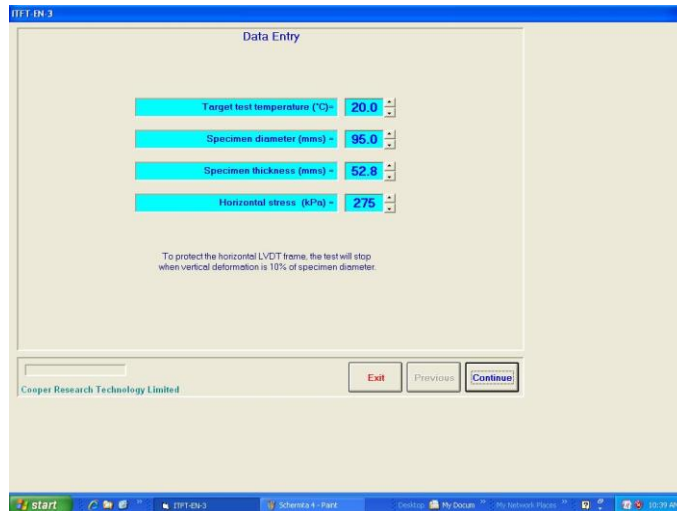


Figura 46 "Schermata software per inserimento dati di input per prova ITFT"

- 6) Si procede al corretto posizionamento dei trasduttori: questi vengono regolati attraverso le due viti passanti per uno dei due lamierini incollati precedentemente. La taratura di ciascun trasduttore avviene posizionando quest'ultimo tra la vite del lamierino, su cui è stato appuntato un piccolo dado, e una cavità dell'altro lamierino. Per tarare il trasduttore si allenta o si stringe ciascuna vite facendo in modo che la lancetta comparsa sul monitor sia in prossimità del livello 1 [Figura 47].

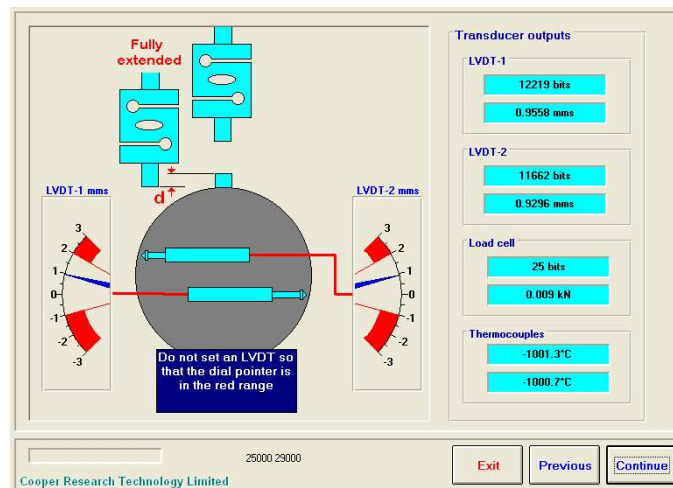


Figura 47 "Schermata software per registrazione dei trasduttori nella prova ITFT"

- 7) Si avvia la prova cliccando sul tasto start test che è comparso sul monitor, il pistone andrà in posizione trovando il contatto con la barra di carico e il test si avvierà automaticamente. Dopo i primi 115 cicli, il software fornisce il valore della deformazione iniziale ϵ_0 che sarà utile per costruire la curva di fatica. All'avanzare dei cicli il software restituisce un grafico deformazione-numero di cicli [Figura 48] con

l'asse delle ascisse logaritmico e asse delle ordinate che può essere sia logaritmico che non;

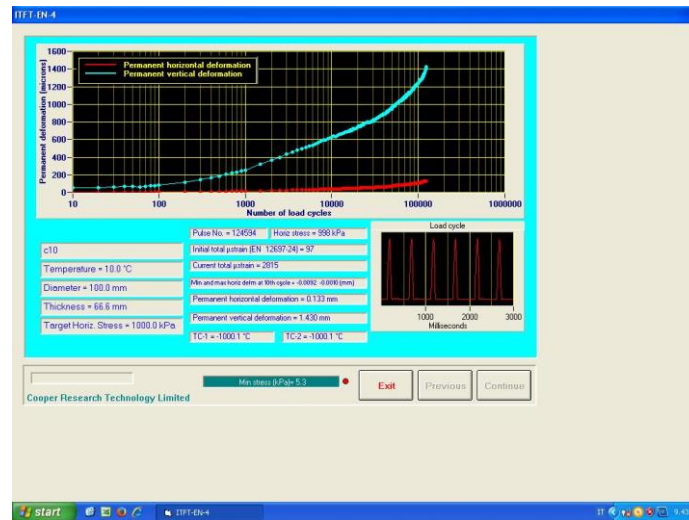


Figura 48 "Grafico di output della prova ITFT"

8) Arresto la prova al raggiungimento del punto di rottura del provino.

3.3. NOMENCLATURA PROVINI

Allo scopo di differenziare i vari provini e distinguere i vari impasti e tipi di fibre è stata utilizzata la seguente nomenclatura:

$$\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\theta$$

Dove:

- $\alpha = A, B, C$ è il numero di impasto. Ogni giorno sono stati fatti due o tre impasti dai quali si sono ricavati per ciascun impasto dai tre ai cinque provini;
- $\beta = F$ indica un impasto con la presenza di fibre. In questa sperimentazione sono stati realizzati solo impasti con fibre;
- $\gamma = 1$ o 2 fornisce informazioni sul tipo di fibra utilizzata. La fibra 1 è la fibra tessile proveniente da PFU, mentre la fibra 2 è la fibra in polipropilene”;
- $\delta = 0.1\%$ o 0.2% indica la percentuale di fibra utilizzata. Per ciascuna fibra sono stati realizzati dai 10 ai 15 provini con un dosaggio del 0.2% , mentre sono stati realizzati 4 provini con un dosaggio del 0.1% ;
- $\varepsilon = 1, 2, \dots, 15$ e I, II, III, \dots, X rappresenta il numero del provino per una miscela con stesso tipo e percentuale di fibre. I provini con numeri naturali sono provini con diametro di 150 mm. I provini con numeri romani hanno invece diametro pari a 100 mm;

- ϑ = sup o inf, indica la parte superiore o inferiore di quei provini di diametro di 100 mm che sono stati tagliati a metà per ottenere altezze di circa 6 cm; pertanto, questa indicazione non è sempre presente;

Quindi ad esempio il nome *BF2_0.2%_VI* indica il sesto provino di una certa miscela (VI) realizzato con il secondo impasto (lettera B) contenente fibre (lettera F) in polipropilene (2) con un dosaggio in volume del 0.2%

Dei 58 provini realizzati, 28 vengono carotati con la macchina carotatrice con un diametro di 100 mm di cui 22 successivamente tagliati a metà al fine di avere due provini dell'altezza di circa 6 cm. I restanti 30 provini del diametro di 150 mm vengono tagliati a metà al fine di ottenere provini di altezza di circa 6 cm senza però effettuare il carotaggio. Sui differenti provini sono state realizzate le seguenti prove:

- Prove di modulo complesso a compressione;
- Prove di fatica in configurazione di trazione indiretta;
- Prove ITS;
- Prove ITSM;

3.4. TABELLA RIASSUNTIVA PROVE

Nella Tabella 4 si riassume il numero dei provini testati per ogni prova:

TIPOLOGIA MISCELA	PROVA									
	ITSM				ITFT	MODULO COMPLESSO	ITS			
	3 gg	7 gg	14 gg	30 gg	30 gg	30 gg	3 gg	7 gg	14 gg	30 gg
FIBRA 1 0.2%	8	8	8	22	14	3	3	3	3	3
FIBRA 1 0.1%	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-
FIBRA 2 0.2%	8	8	8	22	14	3	3	3	3	3
FIBRA 2 0.1%	-	-	-	8	8	-	-	-	-	-
RIFERIMENTO	-	-	-	14	14	3	3	3	3	3

Tabella 4 "Riepilogo del numero di provini testati per ciascuna prova"

4. MATERIALI

In questo capitolo si descrivono nel dettaglio tutti i materiali utilizzati per il confezionamento delle miscele studiate:

- Fresato detto anche RAP in tre diverse granulometrie ossia fine, grosso e 16/20 mm;
- Cemento Portland 32.5R [Figura 56];
- Filler di recupero [Figura 54];
- Emulsione bituminosa tradizionale;
- Due tipologie di fibre di rinforzo;
- Acqua di assorbimento e di aggiunta;

4.1. FRESATO o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Il Reclaimed Asphalt Pavement è il prodotto ottenuto in seguito alla lavorazione di fresatura di strati di pavimentazione stradale in conglomerato bituminoso. Questo RAP viene chiamato anche “fresato” e può avere differenti caratteristiche in funzione dello strato che si va a fresare e della velocità con la quale la macchina fresatrice avanza. Solitamente questo non è nient’altro che conglomerato bituminoso frantumato, quindi costituito all’incirca per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato. Per determinare la granulometria del fresato è stata effettuata un’analisi granulometrica seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1. Per il confezionamento della miscela sono state impiegate diverse pezzature, provenienti tutte dallo stesso impianto di produzione di conglomerato bituminoso sito nella provincia di Ancona:

- RAP 16/20 [Figura 52];
- RAP grosso [Figura 49];
- RAP fino [Figura 49];



Figura 49 "RAP fino e Rap grosso"

Di seguito si mostrano i risultati ottenuti dall'analisi granulometrica delle varie pezzature di RAP impiegato.

4.1.1. RAP FINO

Campione	RAP fino				
	Setaccio (apertura)	Trattenuto per setaccio	Trattenuto per setaccio	Trattenuto cumulativo	Passante cumulativo
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]
31.5	0	0.0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	0.0	100.0
16	0	0.0	0.0	0.0	100.0
10	33.9	1.9	1.9	1.9	98.1
8	86.4	4.8	6.7	6.7	93.3
4	401.6	22.2	28.9	28.9	71.1
2	463.4	25.7	54.6	54.6	45.4
1	413.4	22.9	77.5	77.5	22.5
0.5	244.9	13.6	91.1	91.1	8.9
0.25	92.7	5.1	96.2	96.2	3.8
0.125	39.4	2.2	98.4	98.4	1.6
0.063	8.4	0.5	98.9	98.9	1.1
FONDO	20.9	1.2	100	100	0

Tabella 5 "Risultati dell'analisi granulometriche per RAP fino"

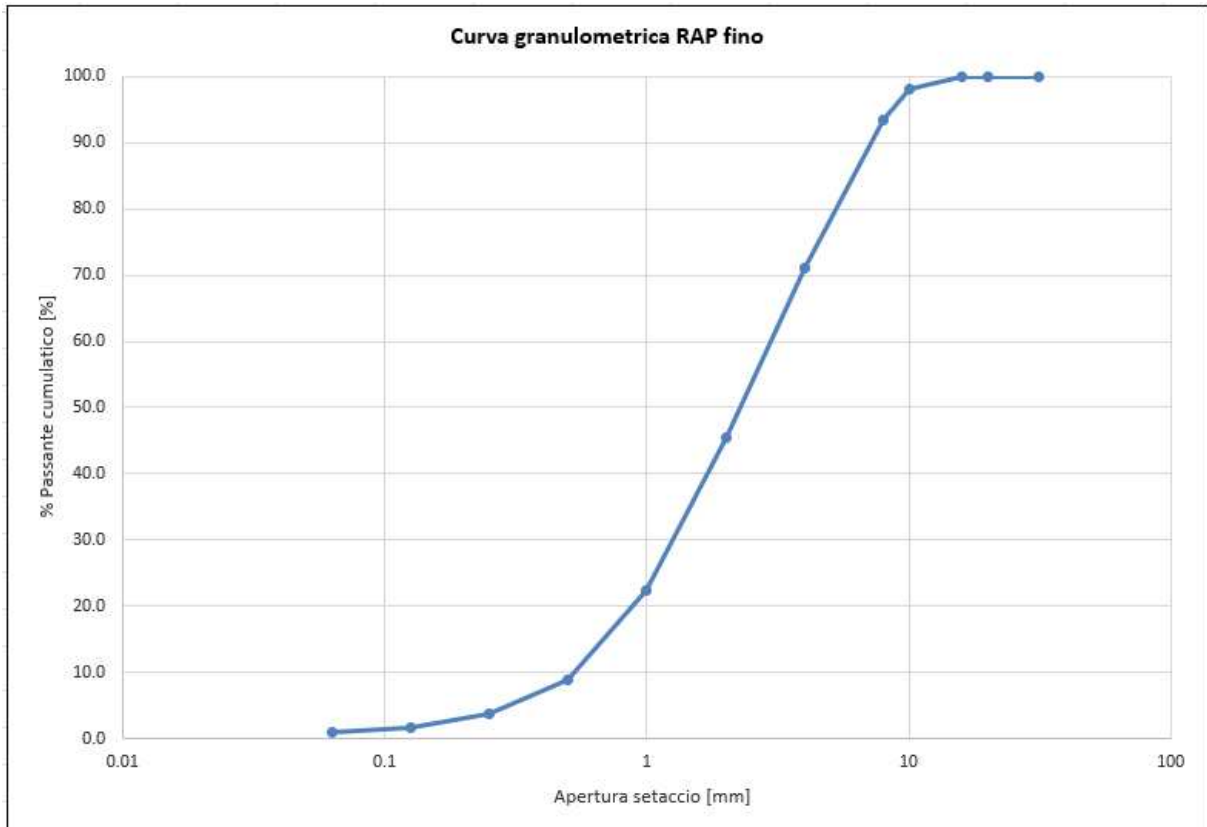


Figura 50 "Curva granulometrica del RAP fino"

4.1.2. RAP GROSSO

Campione	RAP grosso				
	Setaccio (apertura)	Trattenuto per setaccio	Trattenuto per setaccio	Trattenuto cumulativo	Passante cumulativo
	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
	31.5	0	0.0	0.0	100.0
	20	0	0.0	0.0	100.0
	16	208.4	9.8	9.8	90.2
	10	368.2	17.3	27.1	72.9
	8	200.8	9.4	36.5	63.5
	4	424.2	19.9	56.4	43.6
	2	347.6	16.3	72.7	27.3
	1	251.5	11.8	84.5	15.5
	0.5	155.2	7.3	91.8	8.2
	0.25	71	3.3	95.1	4.9
	0.125	47.2	2.2	97.3	2.7
	0.063	17.3	0.8	98.1	1.9
	FONDO	38.5	1.8	100	0

Tabella 6 "Risultati dell'analisi granulometrica per RAP grosso"

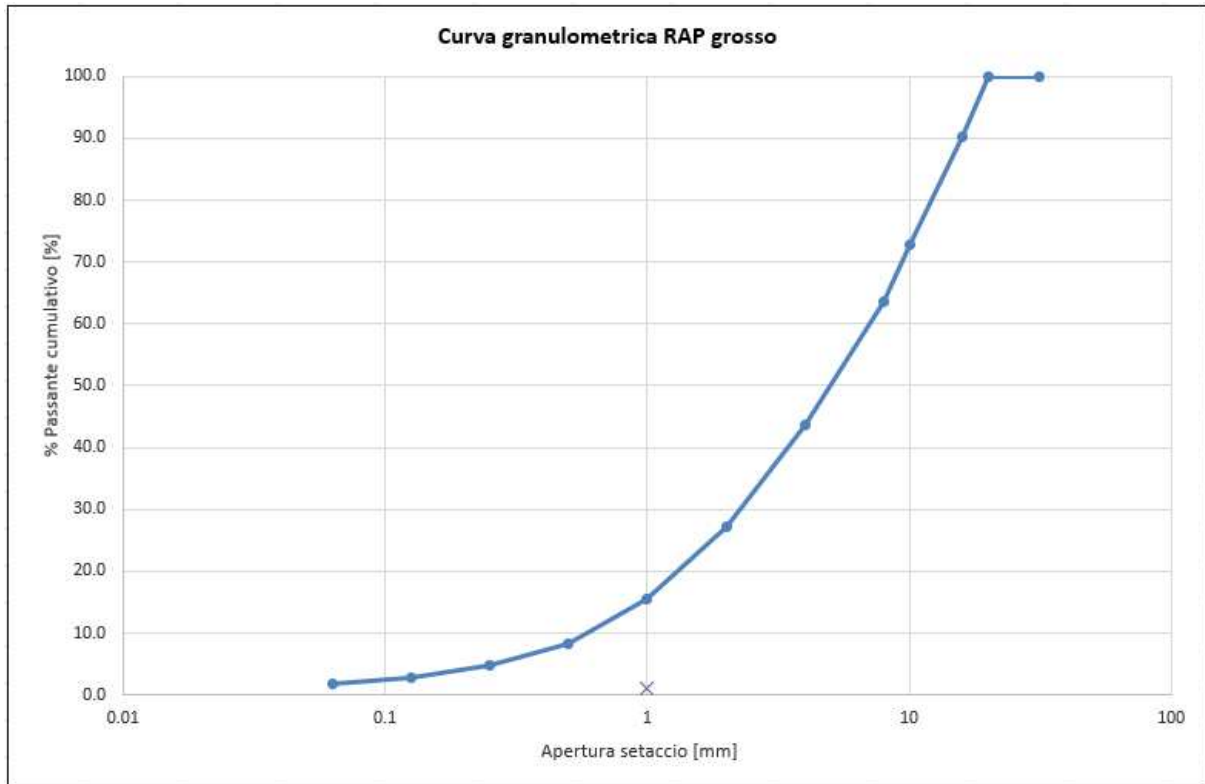


Figura 51 "Curva granulometrica del RAP grosso"

4.1.3. RAP 16/20



Figura 52 "RAP 16/20"

Campione	RAP 16/20			
Setaccio (apertura)	Trattenuto per setaccio	Trattenuto per setaccio	Trattenuto cumulativo	Passante cumulativo
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	0	0.0	0.0	100.0
16	1175	100.0	100.0	0.0
10	0	0.0	100.0	0.0
8	0	0.0	100.0	0.0
4	0	0.0	100.0	0.0
2	0	0.0	100.0	0.0
1	0	0.0	100.0	0.0
0.5	0	0.0	100.0	0.0
0.25	0	0.0	100.0	0.0
0.125	0	0.0	100.0	0.0
0.063	0	0.0	100.0	0.0
FONDO	0	0.0	100.0	0.0

Tabella 7 "Risultati dell'analisi granulometrica per RAP 16/20"

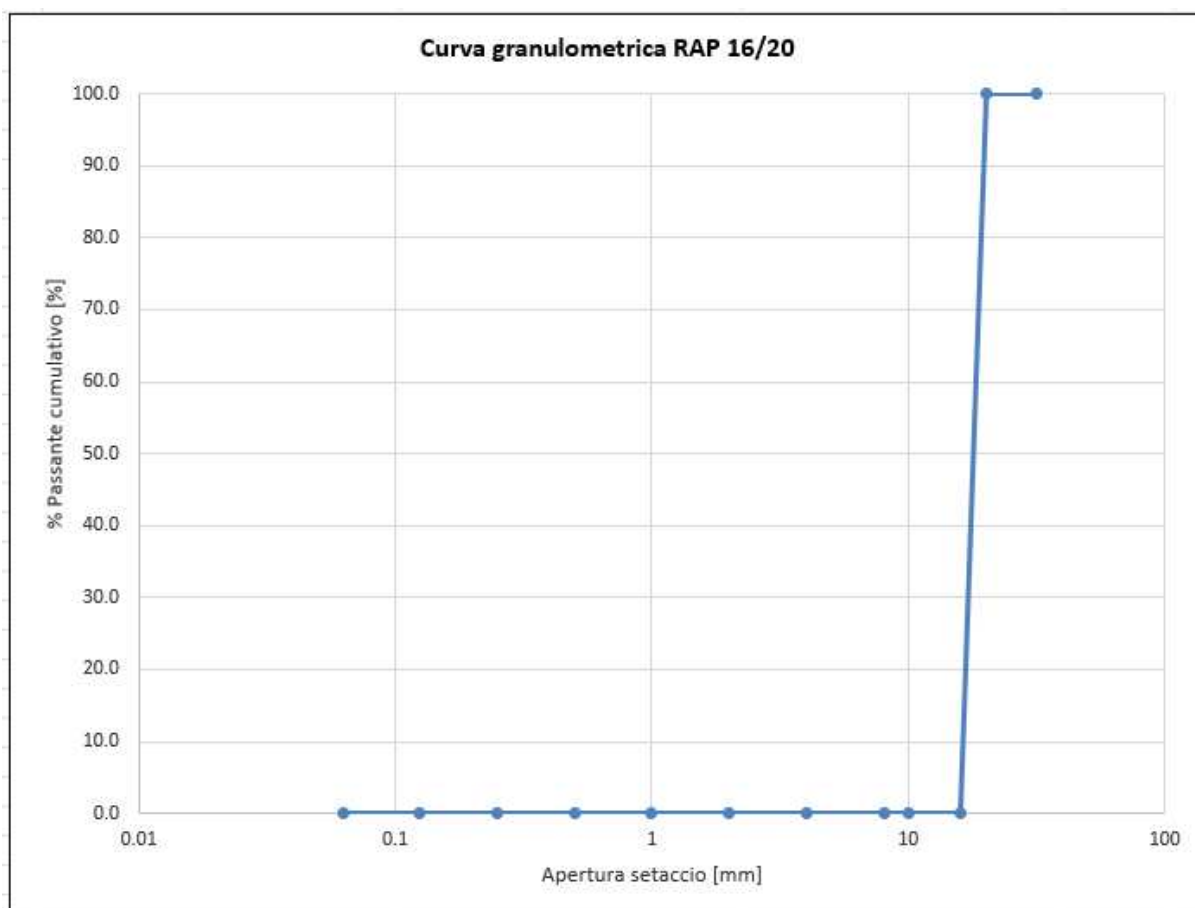


Figura 53 "Curva granulometrica del RAP 16/20"

4.2. FILLER DI RECUPERO

Al fine di integrare la curva granulometrica ed ottenere un fuso granulometrico ottimale si ricorre all'utilizzo di un filler, in particolare filler di recupero [Figura 54].



Figura 54 "Filler di recupero"

Questo è un materiale che si ottiene dalla frantumazione di roccia calcarea. Questo è composto solitamente da carbonato di calcio, calce, cemento (non del tipo a presa rapida) o ceneri volanti e si ricava dalla pulizia dei filtri che raccolgono i fumi in uscita dal cilindro di miscelazione del conglomerato. È caratterizzato da dimensioni finissime e serve per colmare quella carenza di materiale molto fine data dalla grossolana pezzatura dei vari fresati. 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.

Quando si utilizza del filler bisogna prestare molta attenzione ai seguenti aspetti:

- un eccesso nel dosaggio aumenta la velocità di rottura dell'emulsione in quanto incrementa in maniera sensibile la superficie specifica offerta dagli aggregati;
- 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.

Di seguito si mostrano le caratteristiche granulometrica di tale filler:

Campione	Filler di recupero
Setaccio (apertura)	Passante cumulativo
[mm]	[%]
31.5	100.0
20	100.0
16	100.0
10	100.0
8	100.0
4	100.0
2	100.0
1	100.0
0.5	100.0
0.25	99.1
0.125	92.4
0.063	79.3

Tabella 8 "Risultati dell'analisi granulometrica per filler di recupero"

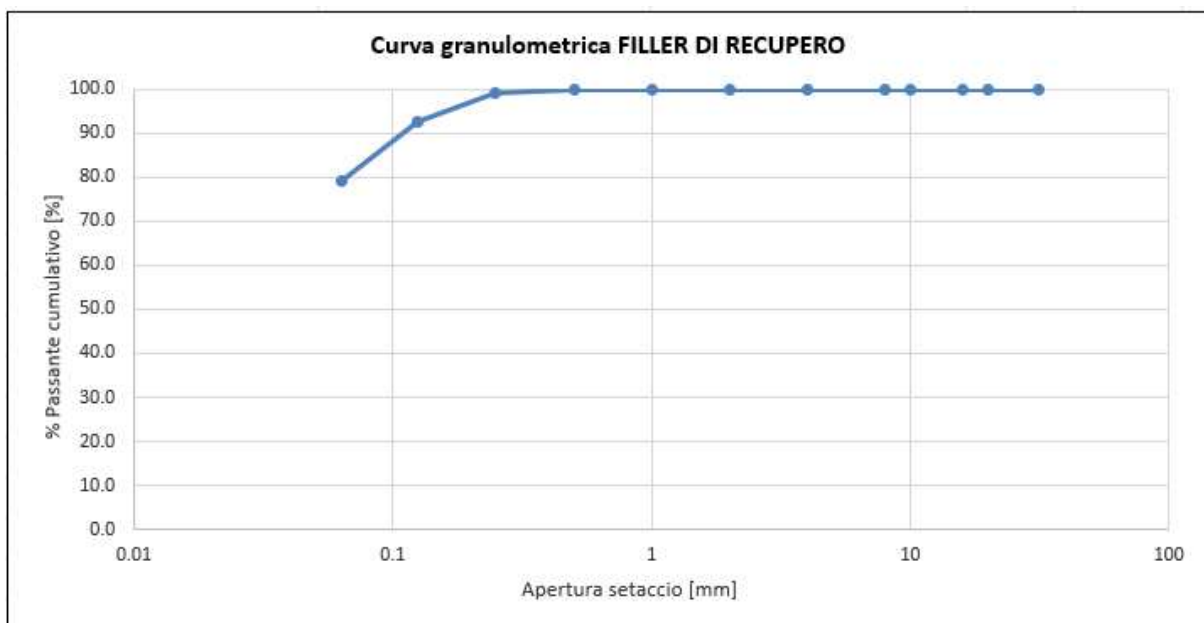


Figura 55 "Curva granulometrica del filler di recupero"

4.3. CEMENTO 32.5 R

Per questa analisi sperimentale è stato utilizzato un cemento di tipo Portland al calcare, classificato CEM II/B-LL 32.5R [Figura 56].



Figura 56 "Cemento 32.5 R"

Questo è una particolare tipologia di cemento che si può ottenere dalla miscelazione del clinker, con l'aggiunta di gesso biidrato oppure, più raramente, di anidrite naturale. Il comportamento chimico-fisico del cemento nel momento in cui viene miscelato con acqua può essere descritto in 3 fasi principali:

- **Fase di idratazione:** In questa fase, la pasta di cemento ottenuta unendo acqua e cemento, a seconda del quantitativo di acqua impiegata, si presenta come una massa di consistenza plastico-fluida dotata di scorrevolezza ed eccellente deformabilità, in grado di assumere la forma di un qualsiasi contenitore all'interno della quale viene messa. Questa fase inizia immediatamente dopo il contatto tra l'acqua ed il cemento e dura circa dieci minuti;
- **Fase di presa:** con il passare del tempo la pasta inizia a solidificare e a perdere tutte quelle caratteristiche che aveva nella fase di miscelazione. Questa fase che dura circa due tre ore si sviluppa in seguito alla formazione di ettringite;
- **Fase di indurimento:** circa 24 ore dopo la miscelazione con acqua il composto assume le sembianze di un materiale lapideo con un'ottima resistenza meccanica a compressione. Questa resistenza dipende dal livello di idratazione del cemento e dal rapporto acqua/cemento. In questa fase inizia lo sviluppo fibroso del prodotto idratato;

Per quanto concerne il dosaggio di questo materiale per la realizzazione di conglomerati bituminosi, questo si aggira approssimativamente a un 1-3% sulla massa degli aggregati. Dosaggi maggiori sono sconsigliati da utilizzare perché questi tendono a snaturare il comportamento della miscela che perderebbe le caratteristiche di un conglomerato bituminoso, avvicinandosi a quelle di un misto cementato. L'aggiunta di cemento nell'impasto

influenza le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche del conglomerato bituminoso. Il cemento viene aggiunto con l'obiettivo di aumentare la resistenza. Tuttavia, un dosaggio sempre maggiore di cemento allo scopo di ottenere una maggiore resistenza, può ridurre le prestazioni del conglomerato in quanto si tende ad un comportamento sempre più friabile del composto e dunque una scarsa resistenza a fatica.

Per le miscele stabilizzate a freddo con emulsione bituminosa, contenenti cemento, è di fondamentale importanza il contenuto d'acqua nell'impasto. L'acqua è necessaria per attivare il cemento che si deve idratare e questo si può verificare solamente nelle miscele a freddo, per la disponibilità di acqua; nel caso in cui mancasse acqua allora il cemento diventerebbe un semplice filler inerte. Inoltre, l'idratazione del cemento ci consente di sottrarre acqua all'impasto e di produrre calore mediante la reazione esotermica che si manifesta, favorendo la rottura dell'emulsione da un lato e la presa finale dall'altro. Ciò evidenzia l'importanza del cemento, anche come agente di adesione per il legante nelle miscele bituminose a base d'emulsione.

4.4. EMULSIONE BITUMINOSA

L'emulsione bituminosa è uno dei materiali utilizzati per la realizzazione della miscela. Questa si utilizza in quanto il fresato contiene bitume invecchiato molto viscoso e fragile ed è necessario ristabilire le giuste caratteristiche prestazionali della miscela finale. L'emulsione bituminosa è un composto caratterizzato da due prodotti liquidi:

- Componente disperdente ossia l'acqua;
- Componente dispersa sottoforma di piccole gocce ossia il bitume;

Questo prodotto ci consente di avere un'ottima lavorabilità del bitume che a temperatura ambiente sarebbe estremamente viscoso. Ciò comporta una notevole riduzione dei costi grazie alla mancata necessità di riscaldare il bitume oltre che a ridurre l'impatto ambientale. L'acqua, quindi, consente al bitume di risultare estremamente lavorabile a temperatura ambiente. L'emulsione bituminosa è solitamente costituita da un 40% in volume di acqua e da un 60% in volume di bitume, oltre alla presenza molto spesso di additivi che servono ad impedire la separazione tra le due fasi. Questi additivi prendono il nome di additivi emulsionanti. In seguito alla miscelazione di emulsione bituminosa e aggregati, l'acqua si separa lasciando il bitume attaccato agli aggregati e rivestendoli completamente. L'acqua viene espulsa nel nostro caso in seguito alla compattazione dei provini con pressa giratoria. La

separazione delle due fasi prende il nome di rottura dove si manifesta un aumento notevole di viscosità riducendone la lavorabilità. Dobbiamo fare attenzione quindi a saper scegliere qual è la giusta emulsione da utilizzare per avere l'ottimale velocità di rottura. In commercio troviamo le seguenti tipologie di emulsione bituminosa:

- Emulsione bituminosa a rottura sovrastabilizzata (LL);
- Emulsione bituminosa a rottura lenta (EL);
- Emulsione bituminosa a rottura media (EM);
- Emulsione bituminosa a rottura rapida (ER);
- Emulsione bituminosa a rottura super rapida (RR);

La velocità di rottura dipende dai seguenti aspetti:

- Modalità di compattazione e miscelazione;
- Dimensione delle particelle (goccioline) di bitume disperso;
- Natura e dimensione degli aggregati che compongono la miscela;
- Temperatura dell'emulsione bituminosa al momento della miscelazione;
- Temperatura dell'ambiente

La rottura dell'emulsione bituminosa avviene in tre fasi principali:

- **Fase di decantazione**, che consiste nella sedimentazione delle piccole particelle di bitume;
- **Fase di flocculazione**, dove le particelle di bitume si avvicinano le une con le altre;
- **Fase di coagulazione**, in cui le particelle di bitume si legano tra di loro;

La presa dell'emulsione avviene dopo la rottura della stessa in cui si verifica la perdita di acqua e l'adesione agli inerti. In questa fase si possono avere diverse criticità. Ad esempio, non si riesce ad avere un rivestimento omogeneo degli inerti con bitume. Un'altra criticità è dovuta al fatto che le caratteristiche meccaniche necessarie vengono raggiunte dopo un periodo di maturazione che può avvenire anche dopo mesi. Nella presente analisi sperimentale è stata utilizzata un'emulsione bituminosa tradizionale. Questa è un tipo di emulsione che si ottiene per distillazione del bitume realizzata appositamente per contenere elevate percentuali di RAP quindi molto efficaci per riciclaggi a freddo. Questa emulsione si ottiene per semplicemente miscelando in un mulino il bitume distillato, l'acqua e i vari additivi emulsionanti. Generalmente si utilizza questa emulsione per realizzare misti granulari legati a cemento e calce.

(Santagata, 2019)

Per la realizzazione dei nostri impasti è stata utilizzata l'emulsione RIGEVAL CM [Figura 57] prodotta dalla ditta Valli Zabban.



Figura 57 "Emulsione bituminosa RIGEVAL CM"

Successivamente se ne riporta la scheda tecnica [Figura 58]:

SCHEDA TECNICA
RIGEVAL CM

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

Figura 58 "Scheda tecnica dell'Emulsione Bituminosa RIGEVAL CM "

4.5. ACQUA

L'acqua è un ingrediente fondamentale per la produzione di miscele in conglomerato bituminoso. L'acqua da utilizzare non deve contenere tracce di alcani, materia organica, oli, alcali e tutte quelle impurità che possono alterare la maturazione e le proprietà della miscela. In questa sperimentazione è stata utilizzata della semplice acqua acquistata in negozio. Nei conglomerati riciclati a freddo si utilizza solitamente una quantità di acqua pari a circa il 5-7% in massa rispetto al RAP. È bene inoltre effettuare dei controlli indiretti di questo quantitativo come, ad esempio, la pesatura della fustella con materiale prima e dopo la fase di compattazione con pressa giratoria. Al momento della miscelazione si hanno diversi quantitativi di acqua presenti nei vari ingredienti utilizzati:

- Acqua presente nell'emulsione bituminosa;
- Acqua presente nel fresato che molte delle volte viene stoccato all'aperto negli

stabilimenti di produzione ed è quindi esposto alle intemperie e all'umidità ambientale;

- Acqua di raffreddamento apportata dalla macchina fresatrice che utilizza quest'ultima per il raffreddamento del materiale e per la riduzione della produzione di polveri;
- Acqua presente nella boiaccia cementizia nel caso in cui ne sia previsto l'utilizzo;

In questa sperimentazione si ha acqua presente nell'emulsione bituminosa, poi acqua chiamata "di assorbimento" che simula l'umidità degli aggregati stoccati all'aperto e acqua di aggiunta necessaria per la miscelazione. Avere il giusto contenuto di acqua nella miscela ci consente di regolare:

- la rottura dell'emulsione bituminosa;
- i tempi di lavorazione in cantiere;
- la lavorabilità e l'addensabilità della miscela;
- la presa e l'indurimento della frazione cementizia;

Purtroppo, se l'acqua fosse presente in quantità eccessive si potrebbero avere problemi in termini di copertura degli aggregati da parte dell'emulsione bituminosa utilizzata, limitata addensabilità in fase di compattazione e una ridotta durabilità della miscela. È comunque necessario aggiungere sempre un po' di acqua in quanto l'emulsione bituminosa non è in grado di conferire quel livello di lavorabilità di cui si ha bisogno. Un'alternativa potrebbe essere quella di aumentare il dosaggio di emulsione bituminosa e quindi di acqua ma questa produce problemi durante il processo di lavorazione.

4.6. FIBRE

In questa analisi sperimentale sono stati studiati conglomerati bituminosi riciclati a freddo rinforzati con fibre al fine di migliorarne le prestazioni. Sono state utilizzate 2 tipologie di fibra:

- Fibra tessile proveniente dal recupero di PFU, denominata in questa sperimentazione fibra 1;
- Fibre in polipropilene, denominata in questa sperimentazione fibra 2;

4.6.1. FIBRA TESSILE DA RECUPERO DI PFU

Questa è un tipo di fibra che viene ottenuta dal recupero di pneumatici fuori uso ed è stata introdotta con un progetto di livello nazionale chiamato REFIBRE-LIFE in Italia [Figura 60]. Questo progetto aveva come obiettivo quello di individuare possibili fibre provenienti da rifiuti

che potessero essere riutilizzate nel modo dell'industria. Uno dei rifiuti studiati sono stati i PFU ossia Pneumatici Fuori Uso che secondo la normativa vigente possono essere utilizzati per:

- Produzione di energia mediante incenerimento;
- Recupero di materiale come gomma, acciaio e fibre tessili;

In particolar modo, in seguito a particolari trattamenti si riesce ad ottenere gomma elastomerica sottoforma di granuli rimuovendo la parte di battistrada rimanente, filamenti di acciaio armonico presente immediatamente sotto il battistrada e fibra tessile presente all'intradosso dello pneumatico di diversi materiali come nylon e rayon. La fibra tessile, che rappresenta circa il 10% in peso del PFU, a oggi non ha ancora alcun impiego e viene smaltita in discarica o avviata all'incenerimento [Figura 59].



Figura 59 "Utilizzo dei materiali recuperati dai PFU"

Queste fibre tessili sono quelle che si utilizzano in tale sperimentazione al fine di aumentare le prestazioni di conglomerati bituminosi riciclati a freddo. Quello che ci si aspetta è un aumento della resistenza a fatica ed una maggiore durabilità del conglomerato.



Figura 60 "Potenziale utilizzo di tali fibre"

L'idea cardine di questa sperimentazione, quindi, è quella utilizzare queste fibre per rendere il nostro pianeta più sostenibile nel seguente modo:

- Riducendo la quantità di materiale che viene portato a rifiuto per l'incenerimento. Come sappiamo l'incenerimento di materiali nel suo complesso produce un consumo non indifferente di ossigeno e immette nell'atmosfera anidride carbonica;
- Riducendo la quantità di materiale che viene depositato in discarica e che necessiterebbe di migliaia di anni per decomporsi;
- Sfruttando il riciclo di questa fibra non solo come rinforzo per conglomerati bituminosi ma anche come base per la produzione di ulteriori materiali compositi;
- Generando una convenienza economica nell'utilizzo di queste fibre che orienterebbe gli interventi di manutenzione di pavimentazioni stradali verso il riciclaggio a freddo con tutti i suoi benefici;

Con il progetto REFIKRE-LIFE si sono potuti osservare i seguenti risultati:

- riduzione della produzione di rifiuti: 200 ton/anno rifiuti in meno in discarica e 1.000

ton/anno rifiuti in meno destinati all'incenerimento;

- riduzione delle emissioni di gas a effetto serra (GHG): risparmio di 1.000 ton/anno di CO₂ (equivalente a 1.000 viaggi aerei da Roma a Tokyo);
- risparmio di 13.000 kg/anno di SO₂ (equivalente a 1.300 camion Euro5 che percorrono 60.000 Km/anno cadauno);
- risparmio di 1.600 kg/anno di polveri sottili (PM_{2.5,5,10}) (equivalente a 18 bus che percorrono 38.000 km/anno cadauno);
- utilizzo della fibra riciclata come materia prima seconda per la produzione di 6.000 ton/anno di compound plastico (10% di fibra in peso) oppure per la produzione di 400.000 ton/anno di asfalto rinforzato (0,3% di fibra in peso);

Come risulta dai dati di laboratorio, i nuovi materiali hanno migliori prestazioni meccaniche e, quindi, vita media più lunga. Infatti, il compound di PP e tela, pur mantenendo sostanzialmente invariate le altre caratteristiche meccaniche, mostra un incremento notevole della resistenza all'impatto, che passa da 5,6 (solo PP) a 12.3 Kj/m² (PP + 20% di tela), mentre il conglomerato bituminoso con l'aggiunta di tela mostra un incremento notevole del numero di cicli a rottura che passa da 5.128 (miscela senza fibre) a 20.303 (miscele con 0,3% di tela) cicli.

(Il progetto life del mese, REFIBRE-LIFE, 2018)

4.6.2. FIBRA IN POLIPROPILENE

Questa seconda tipologia di fibre è una fibra in polipropilene (trefolata) [Figura 62] che viene utilizzata ad oggi per la realizzazione di superfici in calcestruzzo fibro-rinforzate e in sostituzione della tradizionale armatura in acciaio. Le fibre sono disponibili in due diverse lunghezze, sia da 18 mm che da 54 mm.

Questa fibra possiede la marcatura CE [Figura 61] ed il suo utilizzo è normato per la realizzazione di calcestruzzi fibro-rinforzati.



Figura 61 "Marcatura CE"

Nel caso del calcestruzzo questa fibra consente di migliorare le prestazioni a trazione e flessione, rallentando il fenomeno di fessurazione. Per tale motivo si pensa che queste fibre

possano migliorare anche le prestazioni di conglomerati bituminosi in termini di fatica e di durabilità.

Questa è una fibra che purtroppo può essere utilizzata solo per la produzione di conglomerati bituminosi riciclati a freddo in quanto il loro punto di fusione si aggira attorno ai 160-170 °C. Un vantaggio nell'utilizzo di queste fibre è che sono estremamente leggere, con un peso specifico di 0.91 g/cm³, quindi facilmente movimentabili e trasportabili sia in cantiere che in impianto.

Di seguito si mostrano alcune specifiche tecniche interessanti:

- Resistenza a trazione pari a 516.9 MPa;
- Modulo di Young pari a 5.37 GPa;
- Temperatura di auto-accensione superiore ai 400°C;



Figura 62 "Fibra in polipropilene"

4.7. MISCELA DI PROGETTO

In questo paragrafo si descrive come è stata studiata la miscela degli aggregati e le altre componenti di cui è costituita ma miscela di progetto.

4.7.1. MISCELA DEGLI AGGREGATI

La miscela degli aggregati è composta non solo da fresato di varie pezzature, ma anche da materiali vergini al fine di correggere la curva granulometrica e ricadere all'interno del fuso di riferimento. In particolare, è stato utilizzato del filler di recupero. Questi materiali devono essere obbligatoriamente conformi al Regolamento europeo N. 305/2011 sui prodotti da costruzione e devono essere dotati di marchiatura CE. Questa marchiatura attesta la conformità all'appendice ZA della UNI EN 13043. Ci sono diversi requisiti per ciascuna tipologia

di aggregato [Tabelle 1]:

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

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

Tabelle 1 "Requisiti per ciascuna tipologia di aggregato da Regolamento europeo N. 305/2011"

Bisogna annotare che il fresato grosso prima di essere utilizzato per lo studio della curva granulometrica della miscela degli aggregati e per la realizzazione dei provini richiede l'eliminazione del trattenuto al setaccio da 20 mm. Questa operazione viene fatta per ridurre problemi che si possono avere durante la produzione di provini in laboratorio. Infatti, se questi elementi non venissero rimossi rischieremmo di ottenere provini geometricamente non regolari.

Per ottenere un'ottimale distribuzione granulometrica si è fatto riferimento al fuso granulometrico del "Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano" nel quale sono richieste le seguenti percentuali di passante cumulativo per ciascun setaccio [Tabella 9]:

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

Tabella 9 "Ottimale distribuzione granulometrica secondo il Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano "

Tale fuso viene utilizzato in modo da combinare le varie classi di inerti per ottenere una curva che consenta l'addensamento ottimale del conglomerato bituminoso [Figura 63]. Conoscendo le curve granulometriche dei singoli inerti utilizzati e considerato i limiti del fuso granulometrico, si è potuta determinare la curva di progetto mediante il calcolo su un foglio

Excel e ricavare le percentuali in peso di aggregato da inserire. In Tabella 10 si riportano i risultati ottenuti:

	RAP FINO	RAP GROSSO	RAP 16-20	FILLER DI RECUPERO	Mix di progetto	Mix ottimale
Setaccio	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31.5	100.0	100.0	100.0	100	100.0	100.0
20	100.0	100.0	100.0	100	100.0	100.0
16	100.0	86.5	0.0	100	87.3	84.0
10	98.1	62.7	0.0	100	76.4	77.7
8	93.3	49.7	0.0	100	68.7	68.7
4	71.1	22.3	0.0	100	47.2	44.4
2	45.4	0.0	0.0	100	26.2	26.2
1	22.5	0.0	0.0	100	15.9	14.6
0.5	8.9	0.0	0.0	100	9.8	8.9
0.25	3.8	0.0	0.0	99.1	7.5	7.7
0.125	1.6	0.0	0.0	92.4	6.1	6.1
0.063	1.1	0.0	0.0	79.3	5.1	5.1
% frazione materiale rispetto alla miscela aggregati	0.4493	0.4225	0.0702	0.0581	1.000	

Tabella 10 "Percentuale in peso della frazione di materiale rispetto alla miscela degli aggregati da utilizzare nella miscela"

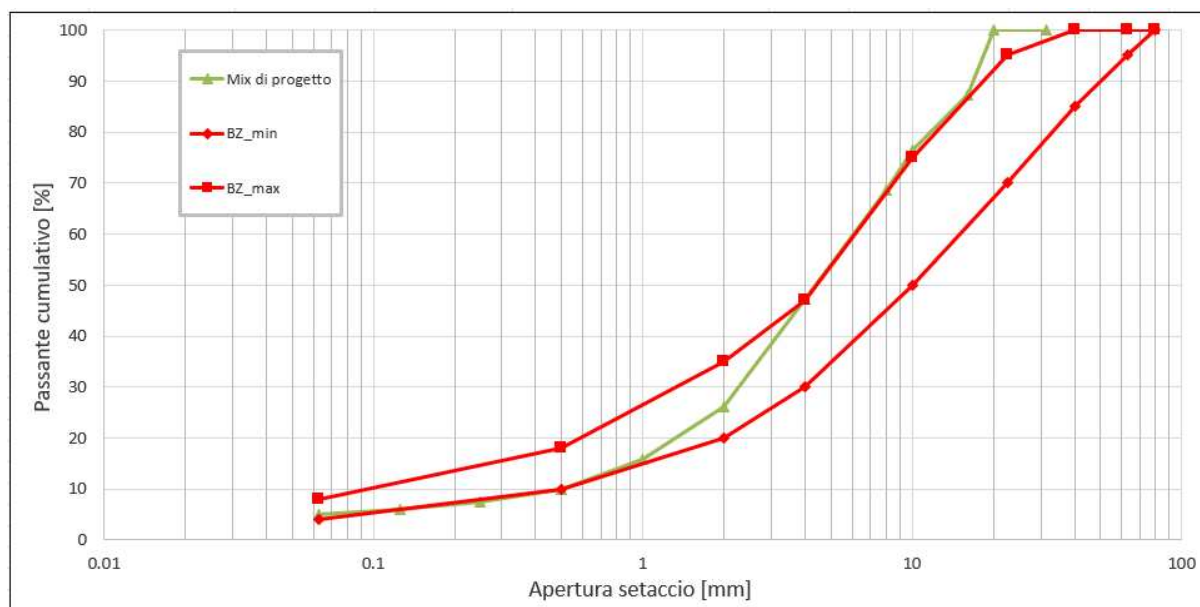


Figura 63 "Curva granulometrica della miscela degli aggregati e fuso di riferimento"

Ricapitolando il tutto, sono state impiegate per la miscela degli aggregati le seguenti percentuali:

- 44.9% di fresato fino;
- 44.2% di fresato grosso;
- 7.0% di fresato 16/20;
- 5.8% di filler di recupero;

4.7.2. COMPOSIZIONE DELLA MISCELA DI PROGETTO

Alla miscela degli aggregati si aggiungono anche:

- Emulsione bituminosa tradizionale; è stata utilizzata una percentuale di emulsione bituminosa rispetto al peso della miscela degli aggregati pari al 4.0%;
- Cemento; è stato impiegato un quantitativo pari al 2% in peso della miscela degli aggregati.
- Acqua di assorbimento; necessaria per ricreare le condizioni di umidità del fresato esposto all'ambiente esterno. Questo quantitativo in percentuale può essere determinato solo dopo aver fatto un'elaborazione dei risultati ottenuti dalla prova con picnometro [Tabella 11];

Column	1	2	3
ID	Name	Dosage of aggregates	Water absorption
		[g]	[%]
RA1	RAP FINO	11383	1.40
RA2	RAP GROSSO	10692	1.60
VA1	RAP 16/20	1777	1.8

Tabella 11 "Percentuale di acqua di assorbimento per ciascun tipo di RAP"

- Acqua di aggiunta; ottenuta come differenza tra l'acqua totale necessaria per addensare l'impasto (5%) meno l'acqua di pre-miscelazione calcolata mediante prove di assorbimento e meno l'acqua presente nell'emulsione bituminosa (circa il 40% del peso dell'emulsione bituminosa). Si è ipotizzato di avere nell'impasto il 5 % in peso rispetto alla miscela degli aggregati di acqua totale;
- Fibra tessile da recupero di PFU e fibra in polipropilene; sono stati realizzati diversi impasti con un dosaggio dello 0.1% e 0.2% in peso della miscela degli aggregati;

In Tabella 12 si riporta uno dei quattro fogli Excel utilizzati per calcolare i giusti quantitativi di materiale, al fine di confezionare gli impasti:

Table 5:mixture			
Column	1	2	3
ID	Name	Dosage oven-dried aggregates	Dosage air-dried aggregates
[-]	[-]	[g]	[g]
RA1	FRESATO FINO	11383	11383
RA2	FRESATO GROSSO	10692	10692
VA1	FRESATO 16/20	1777	1777
Filler	FILLER DI RECUPERO	1471	1471
Water (abs)		362.4	362.4
Cement	32.5 R	506	506
Emulsion		1013	1013
Water di aggiunta		499	499
TOTAL		27702	27702
total for each specimen		2841.3	2841.3
AF1_0.2%	F1 (0,2% SU AGGREG.)	51.7	51.7

Tabella 12 "Ricetta per impasto AF1_0.2%"

Le ricette degli impasti con la seconda fibra sono identiche a quelle precedenti in quanto il quantitativo di fibra utilizzata è una percentuale in peso della miscela degli aggregati.

Dopo il confezionamento dei provini, questi sono stati fatti stagionare in forno ad una temperatura di 40°C al fine di accelerare il processo di maturazione. I provini con numerazione naturale sono stati testati a 3, 7,14 e 30 giorni a prove ITSM e ITS, mentre i restanti solo dopo circa 30 giorni a prove ITSM, fatica e modulo complesso.

5. RISULTATI

In questo capitolo si riportano i risultati di tutte le prove effettuate sui vari provini. In particolare modo si riportano i test eseguiti su provini, realizzati con due tipologie di fibre differenti, oltre che quelli relativi ad un impasto di riferimento privo di fibre. La miscela di riferimento è stata oggetto di un'altra analisi sperimentale. Si ricorda che, come specificato nel paragrafo di nomenclatura, la fibra tessile proveniente da PFU viene denominata fibra 1, mentre la fibra in polipropilene viene indicata come fibra 2.

I risultati di seguito riportati in tabelle e grafici fanno riferimento alle relative prove:

- Analisi delle proprietà volumetriche (percentuale dei vuoti);
- Pesatura periodica dei provini per studio della perdita di acqua;
- Prove ITSM;
- Prove di resistenza a trazione indiretta (ITS);
- Prove di Modulo Complesso di compressione;
- Prove di fatica (ITFT);

5.1. VUOTI

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dallo studio delle proprietà volumetriche dell'impasto di riferimento, dell'impasto con fibra 1 e impasto con fibra 2.

5.1.1. IMPASTO CON FIBRA 1

P_{fino}	44,1
P_{grosso}	41,4
$P_{\text{fres. 16-20}}$	6,9
$P_{\text{filler di recupero}}$	5,69
P_{cemento}	2
P_{bitume}	2,4
$\rho_{\text{fino}} [\text{g/cm}^3]$	2,474
$\rho_{\text{grosso}} [\text{g/cm}^3]$	2,521
$\rho_{\text{fres. 16-20}} [\text{g/cm}^3]$	2,558
$\rho_{\text{filler recupero}} [\text{g/cm}^3]$	2,68
$\rho_{\text{cemento}} [\text{g/cm}^3]$	3,02
$\rho_{\text{bitume}} [\text{g/cm}^3]$	1,02
$\rho_{\text{max}} [\text{g/cm}^3]$	2,4334

Tabella 53 "Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto con fibra 1"

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	ρ _{b,geom} [g/cm ³]	V _m [%]
AF0,2_1	73,7	150,0	2697,3	2,1	14,9
AF0,2_2	72,4	150,0	2710,3	2,1	13,0
AF0,2_3	72,7	150,0	2708,0	2,1	13,4
AF0,2_4	72,8	150,0	2721,5	2,1	13,0
BF0,2_6	71,9	150,0	2705,3	2,1	12,5
BF0,2_8	73,2	150,0	2714,3	2,1	13,7
BF0,2_9	73,2	150,0	2700,3	2,1	14,2
BF0,2_10	72,4	150,0	2702,1	2,1	13,1
CF0,2_12	72,3	150,0	2702,3	2,1	13,0
CF0,2_13	72,5	150,0	2703,6	2,1	13,3
CF0,2_14	72,4	150,0	2714,3	2,1	12,8
CF0,2_15	72,8	150,0	2720,1	2,1	13,1
				Media	13,3

Tabella 14 "Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto con fibra 1"

5.1.2. IMPASTO CON FIBRA 2

P _{fino}	44,1
P _{grosso}	41,4
P _{fres. 16-20}	6,9
P _{filler di recupero}	5,69
P _{cemento}	2
P _{bitume}	2,4
ρ _{fino} [g/cm ³]	2,474
ρ _{grosso} [g/cm ³]	2,521
ρ _{fres. 16-20} [g/cm ³]	2,558
ρ _{filler recupero} [g/cm ³]	2,68
ρ _{cemento} [g/cm ³]	3,02
ρ _{bitume} [g/cm ³]	1,02
ρ _{max} [g/cm ³]	2,4334

Tabella 15 "Determinazione della massa volumica massima relativa ai provini dell'impasto con fibra 2"

Codice provini	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	ρ _{b,geom} [g/cm ³]	V _m [%]
AF0,2_1	72,4	150	2716,6	2,1	12,7
AF0,2_2	71,8	150	2704,6	2,1	12,3
AF0,2_3	72,2	150	2710,8	2,1	12,7
AF0,2_4	71,4	150	2710,7	2,1	11,7
BF0,2_6	71,9	150	2701,7	2,1	12,6
BF0,2_7	72,1	150	2702,5	2,1	12,8
BF0,2_8	72,2	150	2716,0	2,1	12,5
BF0,2_9	72,2	150	2717,0	2,1	12,5
CF0,2_10	72,3	150	2718,3	2,1	12,5
CF0,2_12	72,8	150	2706,9	2,1	13,5
CF0,2_14	71,8	150	2711,1	2,1	12,2
CF0,2_15	72,0	150	2711,7	2,1	12,4
Media					12,5

Tabella 16 Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto con fibra 2"

5.2. PERDITA D'ACQUA

Successivamente si riportano i risultati ottenuti dallo studio della perdita d'acqua dei provini realizzati con differenti tipologie di fibre e dosaggi. I risultati ottenuti fanno riferimento ai provini con numerazione romana.

5.2.1. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%

AF1_0,2%/BF1_0,2% /CF1_0,2%	INIZIALE	a 3 gg	a 7 gg	a 14 gg	a 21 gg	a 26 gg
Codice	Perdita massa _{postmiscel} [%]	Perdita massa _{3gg} [%]	Perdita massa _{7gg} [%]	Perdita massa _{14gg} [%]	Perdita massa _{21gg} [%]	Perdita massa _{26gg} [%]
AF1_0.2%_I	0,74%	3,02%	0,29%	0,31%	0,11%	0,05%
AF1_0.2%_II	0,51%	3,11%	0,36%	0,34%	0,11%	0,04%
AF1_0.2%_III	0,36%	3,24%	0,31%	0,28%	0,11%	0,03%
AF1_0.2%_IV	0,17%	3,19%	0,36%	0,34%	0,10%	0,02%
BF1_0.2%_V	0,67%	3,16%	0,34%	0,33%	0,12%	0,03%
BF1_0.2%_VI	0,22%	3,22%	0,36%	0,34%	0,10%	0,03%
BF1_0.2%_VII	0,10%	3,20%	0,40%	0,33%	0,09%	0,02%
CF1_0.2%_VIII	0,20%	3,42%	0,25%	0,32%	0,10%	0,01%
CF1_0.2%_IX	0,10%	3,28%	0,31%	0,39%	0,09%	0,01%
CF1_0.2%_X	0,01%	3,32%	0,27%	0,28%	0,04%	0,00%
MEDIA	0,31%	3,22%	0,33%	0,33%	0,10%	0,02%

Tabella 17 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini degli impasti con fibra1_0.2%"

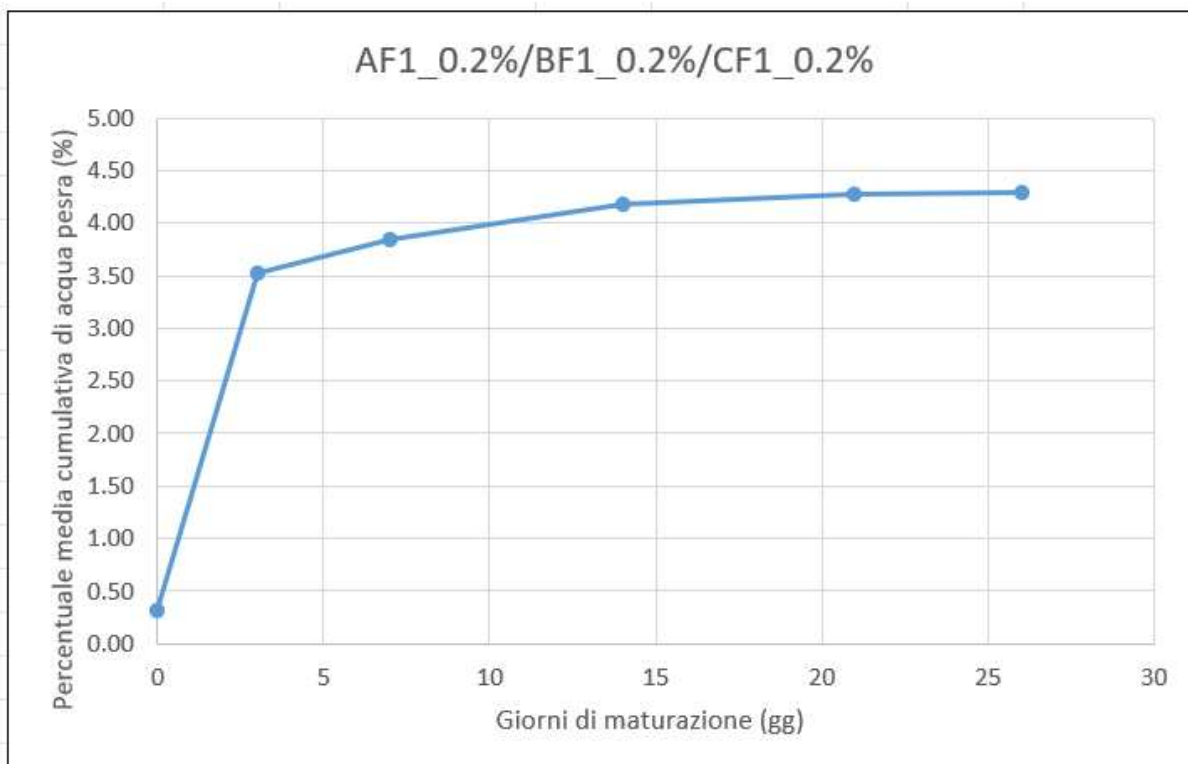


Figura 64 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini degli impasti con fibra1_0.2%"

5.2.2. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.1%

AF1_0,1%	INIZIALE	a 3 gg	a 7 gg	a 14 gg	a 21 gg	a 25 gg
Codice	Perdita massa _{post-miscel} [%]	Perdita massa _{3gg} [%]	Perdita massa _{7gg} [%]	Perdita massa _{14gg} [%]	Perdita massa _{21gg} [%]	Perdita massa _{25gg} [%]
AF1_0.1%_I	0,59%	3,13%	0,26%	0,31%	0,13%	0,05%
AF1_0.1%_II	0,31%	3,17%	0,31%	0,34%	0,14%	0,05%
AF1_0.1%_III	0,16%	3,10%	0,26%	0,35%	0,14%	0,05%
AF1_0.1%_IV	0,17%	3,15%	0,24%	0,30%	0,15%	0,05%
MEDIA	0,31%	3,14%	0,27%	0,32%	0,14%	0,05%

Tabella 18 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.1%"

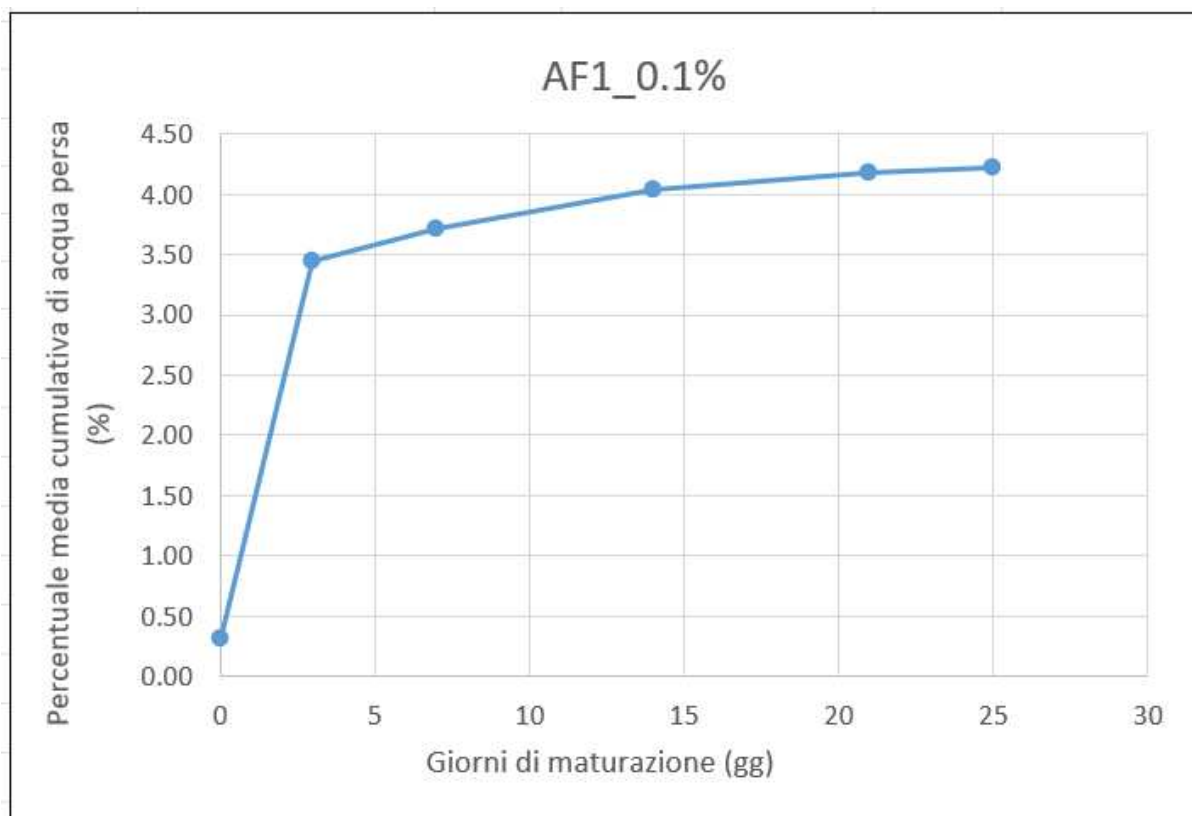


Figura 65 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.1%"

5.2.3. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%

AF2_0,2%/BF2_0,2% /CF2_0,2%	INIZIALE	a 3 gg	a 7 gg	a 14 gg	a 21 gg	a 25 gg
Codice	Perdita massa _{post-miscel} [%]	Perdita massa _{3gg} [%]	Perdita massa _{7gg} [%]	Perdita massa _{14gg} [%]	Perdita massa _{21gg} [%]	Perdita massa _{25g} [%]
AF2_0.2%_I	0,17%	3,42%	0,31%	0,30%	0,11%	0,02%
AF2_0.2%_II	0,05%	3,44%	0,30%	0,30%	0,09%	0,01%
AF2_0.2%_III	0,07%	3,37%	0,33%	0,27%	0,07%	0,00%
BF2_0.2%_IV	0,49%	3,37%	0,24%	0,25%	0,11%	0,05%
BF2_0.2%_V	0,08%	3,32%	0,32%	0,30%	0,10%	0,05%
BF2_0.2%_VI	0,12%	3,39%	0,27%	0,26%	0,09%	0,04%
BF2_0.2%_VII	0,09%	3,35%	0,28%	0,31%	0,12%	0,04%
CF2_0.2%_VIII	0,31%	3,50%	0,27%	0,26%	0,09%	0,02%
CF2_0.2%_IX	0,13%	3,44%	0,29%	0,27%	0,08%	0,01%
CF2_0.2%_X	0,11%	3,46%	0,26%	0,25%	0,08%	0,02%
MEDIA	0,16%	3,41%	0,29%	0,28%	0,09%	0,03%

Tabella 19 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

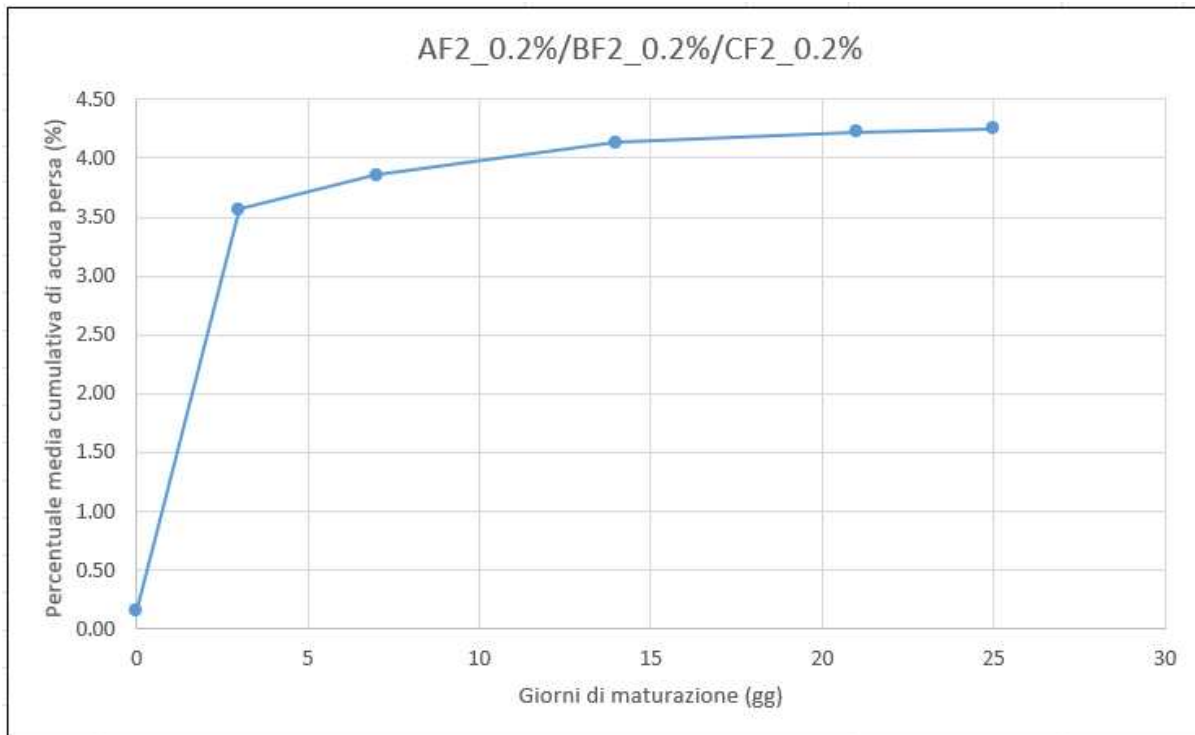


Figura 66 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

5.2.4. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.1%

AF2_0,1%	INIZIALE	a 3 gg	a 7 gg	a 14 gg	a 21 gg	a 25 gg
Codice	Perdita massa _{post miscel} [%]	Perdita massa _{3gg} [%]	Perdita massa _{7gg} [%]	Perdita massa _{14gg} [%]	Perdita massa _{21gg} [%]	Perdita massa _{25gg} [%]
AF2_0.1%_I	0,08%	3,47%	0,32%	0,30%	0,11%	0,02%
AF2_0.1%_II	0,03%	3,49%	0,32%	0,30%	0,11%	0,02%
AF2_0.1%_III	0,01%	3,49%	0,28%	0,25%	0,08%	0,01%
AF2_0.1%_IV	0,00%	3,40%	0,28%	0,32%	0,11%	0,01%
MEDIA	0,03%	3,46%	0,30%	0,29%	0,10%	0,02%

Tabella 20 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.1%"

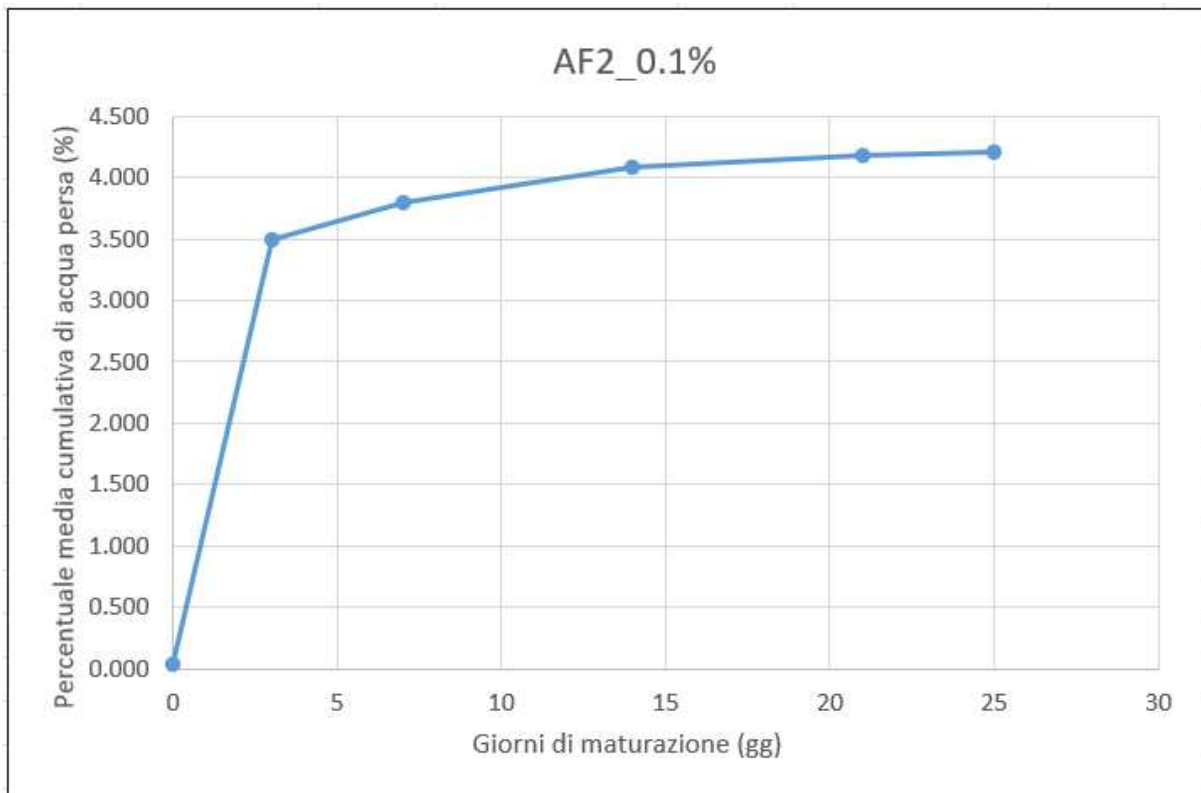


Figura 5 "Perdita di acqua nel tempo relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.1%"

5.3. ITSM

In questo paragrafo si riportano i dati relativi alla prova di modulo di rigidità a trazione indiretta. In questo caso si riportano i risultati di tutti i provini. Per provini con numerazione naturale è stata effettuata la prova ITSM rispettivamente a 3,7,14,30 giorni di maturazione; pertanto, è stato anche elaborato un grafico con l'andamento del modulo al passare del tempo. I provini con numerazione romana sono stati testati solo a 30 giorni di maturazione.

5.3.1. FIBRA1_0.2%

AF1_0,2%/BF1_0,2%/CF1_0,2%	MODULI					
			a 3 gg	a 7 gg	a 14 gg	a 30 gg
Codice	h _m [mm]	D [mm]	ITSM _m [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF1_0.2%_I_sup	57.3	100.3	-	-	-	4116
AF1_0.2%_I_inf	56.2	100.4	-	-	-	4972
AF1_0.2%_II_sup	56.1	100.1	-	-	-	3613
AF1_0.2%_II_inf	56.3	100.5	-	-	-	4684
AF1_0.2%_III_sup	57.5	100.0	-	-	-	4034
AF1_0.2%_III_inf	57.2	100.0	-	-	-	4560
AF1_0.2%_IV_sup	56.4	100.0	-	-	-	3602
AF1_0.2%_IV_inf	56.1	100.2	-	-	-	4131
CF1_0.2%_VIII_sup	59.9	99.9	-	-	-	2465
CF1_0.2%_VIII_inf	60.2	100.0	-	-	-	3494
CF1_0.2%_IX_sup	59.8	100.0	-	-	-	3105
CF1_0.2%_IX_inf	59.9	99.4	-	-	-	3589
CF1_0.2%_X_sup	59.2	99.9	-	-	-	2945
CF1_0.2%_X_inf	59.4	100.2	-	-	-	3302
AF1_0.2%_1	73.7	150	2145	2852	3307	3379
AF1_0.2%_2	72.4	150	-	-	-	-
AF1_0.2%_3	72.7	150	2413	3225	3841	-
AF1_0.2%_4	72.8	150	-	-	-	-
AF1_0.2%_5	73.2	150	2367	3178	3977	3602
BF1_0.2%_6	71.9	150	-	-	-	-
BF1_0.2%_7	72.6	150	2443	3209	3457	3497
BF1_0.2%_8	73.2	150	-	-	-	-
BF1_0.2%_9	73.2	150	2824	3593	4348	4232
BF1_0.2%_10	72.4	150	-	-	-	-
CF1_0.2%_11	71.8	150	2406	3160	4121	3779
CF1_0.2%_12	72.3	150	-	-	-	-
CF1_0.2%_13	72.5	150	2504	3133	3800	3660
CF1_0.2%_14	72.4	150	-	-	-	-
CF1_0.2%_15	72.8	150	2518	3261	3930	-
		MEDIA	2452	3201	3848	3691

Tabella 21 "Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.2%"



Figura 68 "Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.2% con numeri naturali"

5.3.2. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.1%

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]
AF1_0.1%_I_sup	59.7	100.2	4498
AF1_0.1%_I_inf	59.7	100.1	6116
AF1_0.1%_II_sup	60.1	99.6	4736
AF1_0.1%_II_inf	59.3	99.9	5927
AF1_0.1%_III_sup	59.9	100.0	4573
AF1_0.1%_III_inf	59.6	100.0	4737
AF1_0.1%_IV_sup	60.3	100.1	4873
AF1_0.1%_IV_inf	59.9	99.9	5052

Tabella 22 "Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.1%"

5.3.3. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%

			MODULI			
AF2_0.2%/BF2_0.2%/CF2_0.2%			a 3 gg	a 7 gg	a 14 gg	a 30 gg
Codice	h _m [mm]	D [mm]	ITSM _m [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF2_0.2%_I_sup	56.2	100.0	-	-	-	3431
AF2_0.2%_I_inf	55.4	100.0	-	-	-	4553
AF2_0.2%_II_sup	56.6	100.2	-	-	-	3866
AF2_0.2%_II_inf	56.0	100.2	-	-	-	3427
AF2_0.2%_III_sup	55.6	100.2	-	-	-	2907
AF2_0.2%_III_inf	55.6	100.1	-	-	-	3228
BF2_0.2%_IV_sup	56.0	100.1	-	-	-	4037
BF2_0.2%_IV_inf	56.3	100.1	-	-	-	4909
BF2_0.2%_V_sup	55.9	99.8	-	-	-	4092
BF2_0.2%_V_inf	56.0	100.0	-	-	-	4238
BF2_0.2%_VI_sup	55.8	100.2	-	-	-	3646
BF2_0.2%_VI_inf	56.1	100.2	-	-	-	4267
BF2_0.2%_VII_sup	56.4	100.3	-	-	-	3766
BF2_0.2%_VII_inf	56.4	100.3	-	-	-	4266
AF2_0.2%_1	72.4	150	2489	3226	4151	4158
AF2_0.2%_2	71.8	150	-	-	-	-
AF2_0.2%_3	72.2	150	2908	3433	4012	-
AF2_0.2%_4	71.4	150	-	-	-	-
AF2_0.2%_5	72.0	150	3187	4127	4442	4698
BF2_0.2%_6	71.9	150	-	-	-	-
BF2_0.2%_7	72.1	150	2482	3447	3769	4088
BF2_0.2%_8	72.2	150	-	-	-	-
BF2_0.2%_9	72.2	150	2450	3209	-	3043
BF2_0.2%_10	72.3	150	-	-	-	-
CF2_0.2%_11	71.1	150	3025	3793	4274	4943
CF2_0.2%_12	72.8	150	-	-	-	-
CF2_0.2%_13	71.9	150	2821	3855	4184	4509
CF2_0.2%_14	71.8	150	-	-	-	-
CF2_0.2%_15	72.0	150	3223	4010	4456	-
		MEDIA	2823	3637	4184	4240

Tabella 236 "Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

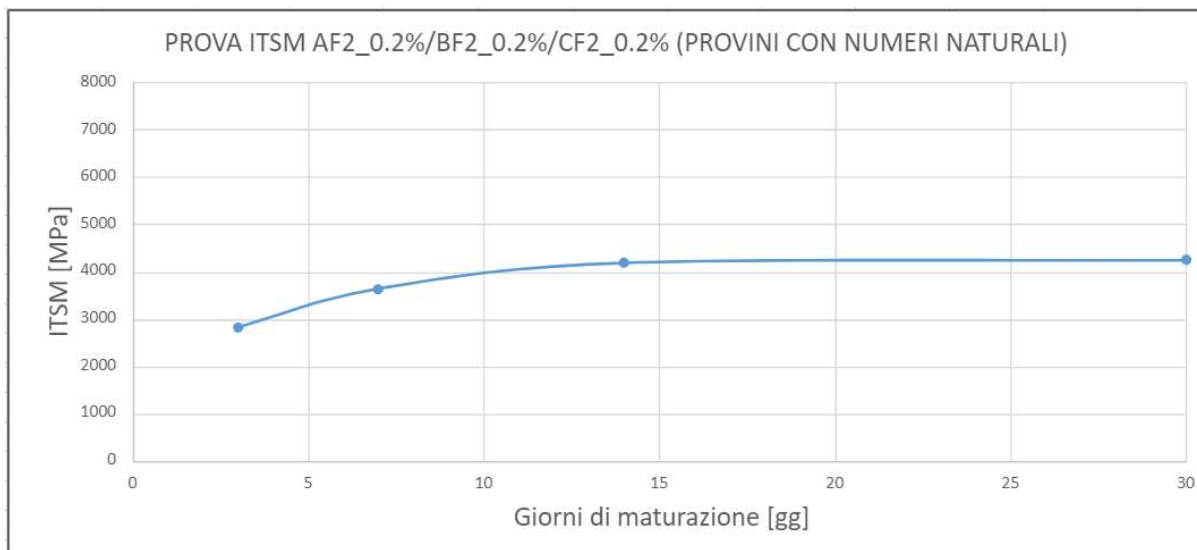


Figura 69 "Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.2% con numeri naturali"

5.3.4. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.1%

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]
AF2_0.1%_I_sup	56.1	99.8	2447
AF2_0.1%_I_inf	57.0	99.8	4694
AF2_0.1%_II_sup	56.0	100.1	3434
AF2_0.1%_II_inf	55.9	100.1	4159
AF2_0.1%_III_sup	56.8	100.1	4240
AF2_0.1%_III_inf	56.8	100.2	4270
AF2_0.1%_IV_sup	55.8	100.6	4272
AF2_0.1%_IV_inf	56.3	100.2	4540

Tabella 24 "Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.1%"

5.4. ITS

La prova a rottura a trazione indiretta è stata effettuata solo su provini con numerazione naturale, anche questa eseguita a 3,7,14 e 30 giorni di maturazione. Di seguito se ne riportano i risultati con relativi grafici.

5.4.1. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%

			ROTTURE			
AF1_0.2%/BF1_0.2%/CF1_0.2%			Rottura dopo 3 gg	Rottura dopo 7 gg	Rottura dopo 14 gg	Rottura dopo 30 gg
Codice	h _m [mm]	D [mm]	ITS [MPa]	ITS [MPa]	ITS [MPa]	ITS [MPa]
AF1_0.2%_1	73.7	150	-	-	-	0.28
AF1_0.2%_2	72.4	150	0.241	-	-	-
AF1_0.2%_3	72.7	150	-	-	0.33	-
AF1_0.2%_4	72.8	150	-	0.334	-	-
AF1_0.2%_5	73.2	150	-	-	-	-
BF1_0.2%_6	71.9	150	-	-	0.388	-
BF1_0.2%_7	72.6	150	-	-	-	-
BF1_0.2%_8	73.2	150	0.306	-	-	-
BF1_0.2%_9	73.2	150	-	-	-	0.37
BF1_0.2%_10	72.4	150	-	0.362	-	-
CF1_0.2%_11	71.8	150	-	-	-	-
CF1_0.2%_12	72.3	150	-	0.364	-	-
CF1_0.2%_13	72.5	150	-	-	-	0.369
CF1_0.2%_14	72.4	150	0.273	-	-	-
CF1_0.2%_15	72.8	150	-	-	0.378	-
		MEDIA	0.273	0.353	0.365	0.370

Tabella 25 "Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.2%"

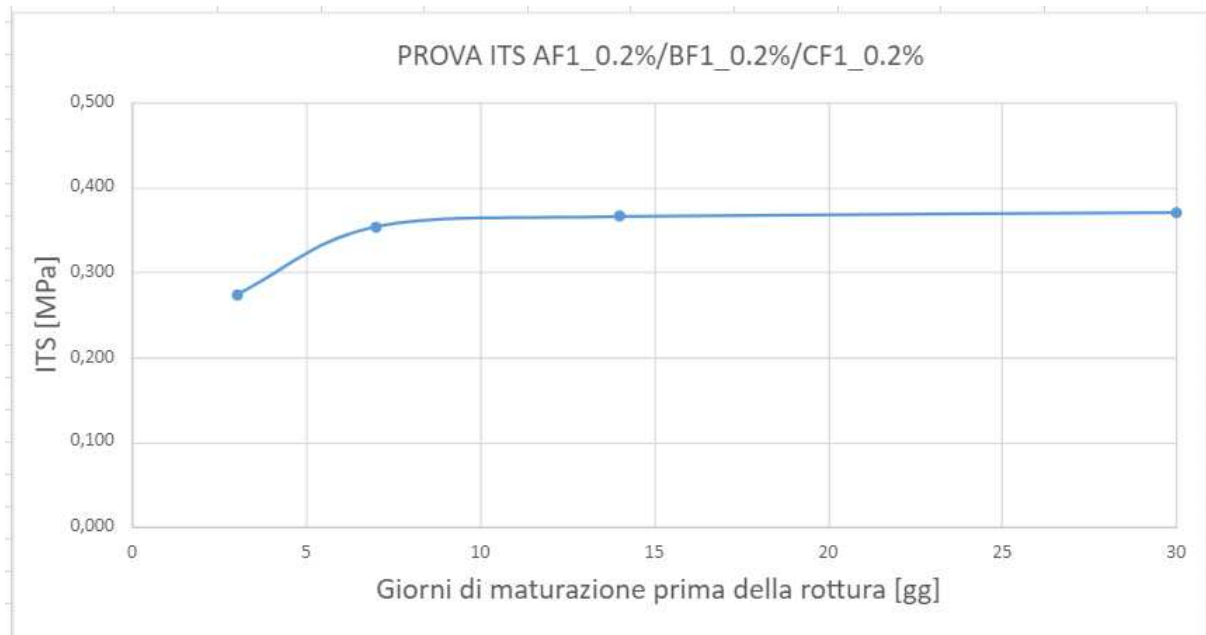


Figura 70 "Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra1_0.2%"

5.4.2. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%

			ROTTURE			
AF2_0,2%/BF2_0,2%/CF2_0,2%			Rottura dopo 3 gg	Rottura dopo 7 gg	Rottura dopo 14 gg	Rottura dopo 30 gg
Codice	h _m [mm]	D [mm]	ITS [MPa]	ITS [MPa]	ITS [MPa]	ITS [MPa]
AF2_0.2%_1	72.4	150	-	-	-	0.503
AF2_0.2%_2	71.8	150	0.448	-	-	-
AF2_0.2%_3	72.2	150	-	-	0.441	-
AF2_0.2%_4	71.4	150	-	0.426	-	-
AF2_0.2%_5	72.0	150	-	-	-	-
BF2_0.2%_6	71.9	150	-	-	0.48	-
BF2_0.2%_7	72.1	150	-	-	-	0.434
BF2_0.2%_8	72.2	150	0.394	-	-	-
BF2_0.2%_9	72.2	150	-	-	-	-
BF2_0.2%_10	72.3	150	-	0.346	-	-
CF2_0.2%_11	71.1	150	-	-	-	-
CF2_0.2%_12	72.8	150	-	0.462	-	-
CF2_0.2%_13	71.9	150	-	-	-	0.491
CF2_0.2%_14	71.8	150	0.429	-	-	-
CF2_0.2%_15	72.0	150	-	-	0.545	-
		MEDIA	0.424	0.411	0.489	0.476

Tabella 26 "Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

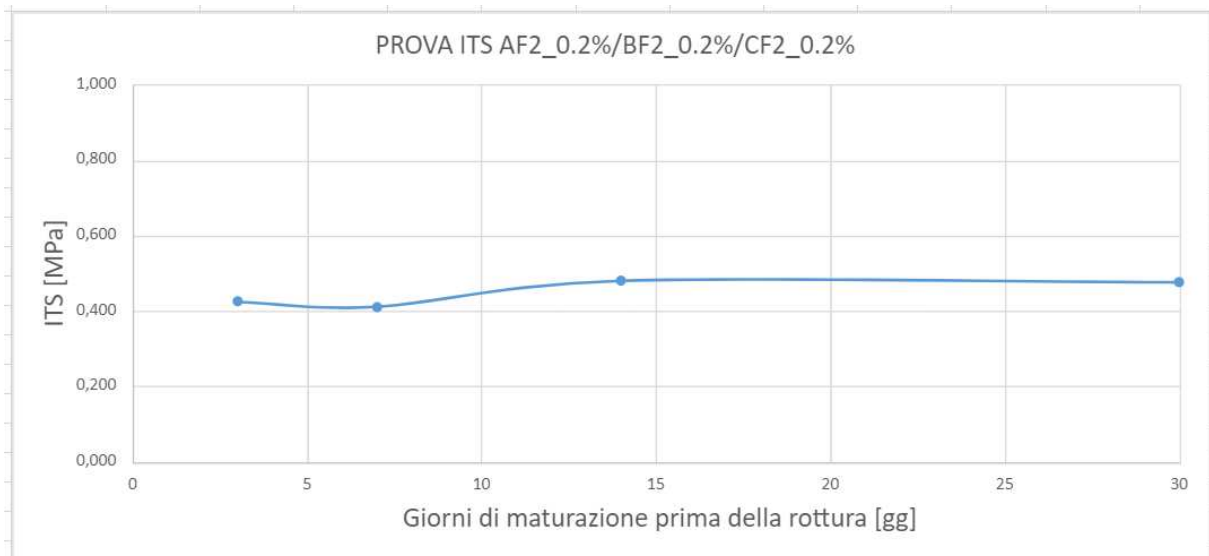


Figura 71 "Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

5.5. MODULO COMPLESSO

Di seguito si mostrano:

- I parametri geometrici di ciascun provino prima e dopo lo spianamento;
- I valori dell'angolo di fase e del modulo complesso registrati alle varie frequenze e temperature di prova;
- L'elaborazione delle curve maestre;

Per questa prova sono stati testati solo i provini ottenuti dall'impasto BF1_0.2% e CF2_0.2% con numerazione romana. Questi provini prendono il nome di provini "alti" in quanto non vengono tagliati a metà, ma lasciati di un'altezza di circa 13 cm.

5.5.1. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%

Per la miscela realizzata con la prima fibra sono stati testati per tutte le temperature di prova solo i provini BF1_0.2%_VI e BF1_0.2%_VII in quanto il provino BF1_0.2%_V è risultato danneggiato dopo il test a 5°C. Per questo motivo non è stata effettuata l'elaborazione della curva maestra di tale provino.

BREVE TERMINE (30 gg)						
Codice	info	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h _m [mm]	D [mm]
BF1_0.2%_V	pre-spianat.	122,3	121,1	120,9	121,6	100,7
	post-spianat.	131,6	131,6	132	131,7	100,7
BF1_0.2%_VI	pre-spianat.	118,3	120,4	118	119,2	100,2
	post-spianat.	121,6	122,1	122,1	121,9	100,2
BF1_0.2%_VII	pre-spianat.	121,9	122,9	119,7	121,3	100,2
	post-spianat.	124,2	124,3	123,4	124,0	100,2

Tabella 27 "Dimensioni geometriche dei provini dell'impasto BF1_0.2%"

BF1_0.2%_V				
Temperatura [°C]	Temp effettiva [°C]	Frequenza [Hz]	1° tentativo	
			E* [MPa]	δ [°]
5		20	4982	6.16
5		10	4655	6.81
5		5	4419	7.35
5	microstrain	2	4176	7.41
5	20-30	1	4013	7.38
5		0.5	3850	7.41
5		0.2	3678	7.69
5		0.1	3550	7.81
20		20	-	-
20		10	-	-
20		5	-	-
20		2	-	-
20	microstrain 20-30	1	-	-
20		0.5	-	-
20		0.2	-	-
20		0.1	-	-
35		20	-	-
35		10	-	-
35		5	-	-
35		2	-	-
35	microstrain 30-40	1	-	-
35		0.5	-	-
35		0.2	-	-
35		0.1	-	-
50		20	-	-
50		10	-	-
50		5	-	-
50	microstrain 30-40	2	-	-
50		1	-	-
50		0.5	-	-
50		0.2	-	-
50		0.1	-	-

Tabella 28 "Risultati della prova di modulo complesso provino BF1_0.2%_V"

BF1_0.2%_VI				
Temperatura [°C]	Temp effettiva [°C]	Frequenza [Hz]	1° tentativo	
			E* [MPa]	δ [°]
5		20	4340	4.61
5		10	4176	4.8
5		5	4063	4.94
5	microstrain	2	3952	5.02
5	20-30	1	3893	5.18
5		0.5	3838	5.05
5		0.2	3780	5.58
5		0.1	3737	5.57
20		20	3195	5.83
20		10	2981	6.34
20		5	2857	6.55
20	microstrain	2	2735	6.66
20	20-30	1	2644	6.98
20		0.5	2539	7.48
20		0.2	2391	8.16
20		0.1	2278	8.44
35		20	1767	9.4
35		10	1597	9.96
35		5	1504	10.64
35		2	1399	10.95
35	microstrain 30-40	1	1329	11.21
35		0.5	1255	11.73
35		0.2	1157	12
35		0.1	1086	12.61
50		20	1136	13.44
50		10	1023	13.39
50		5	938.4	13.85
50	microstrain 30-40	2	840.3	14.23
50		1	771.1	14.34
50		0.5	713.3	14.82
50		0.2	640.8	14.82
50		0.1	590.7	15

Tabella 29 "Risultati della prova di modulo complesso provino BF1_0.2%_VI"

Master Curves E^*

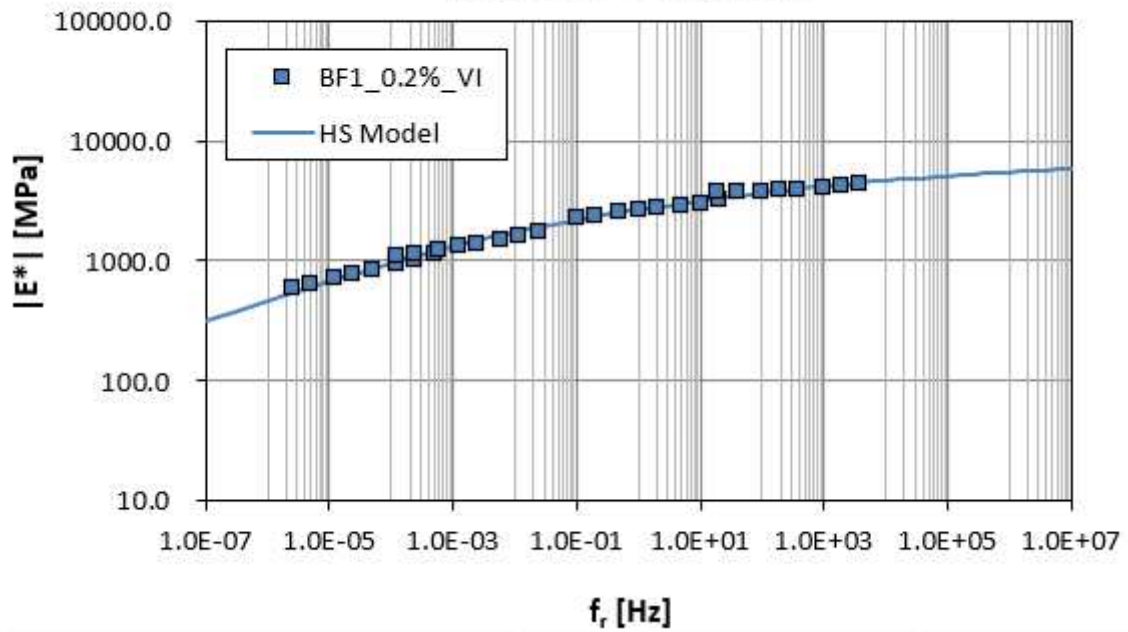


Figura 72 "Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BF1_0.2%_VI"

Master Curves Φ

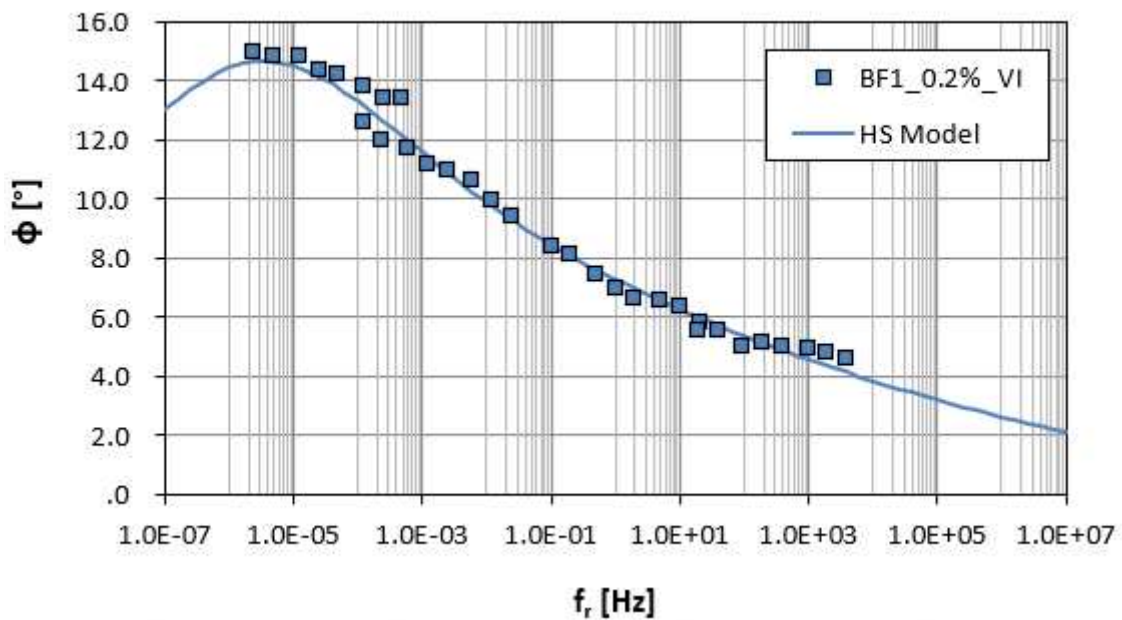


Figura 73 "Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BF1_0.2%_VI"

Diagramma di Black

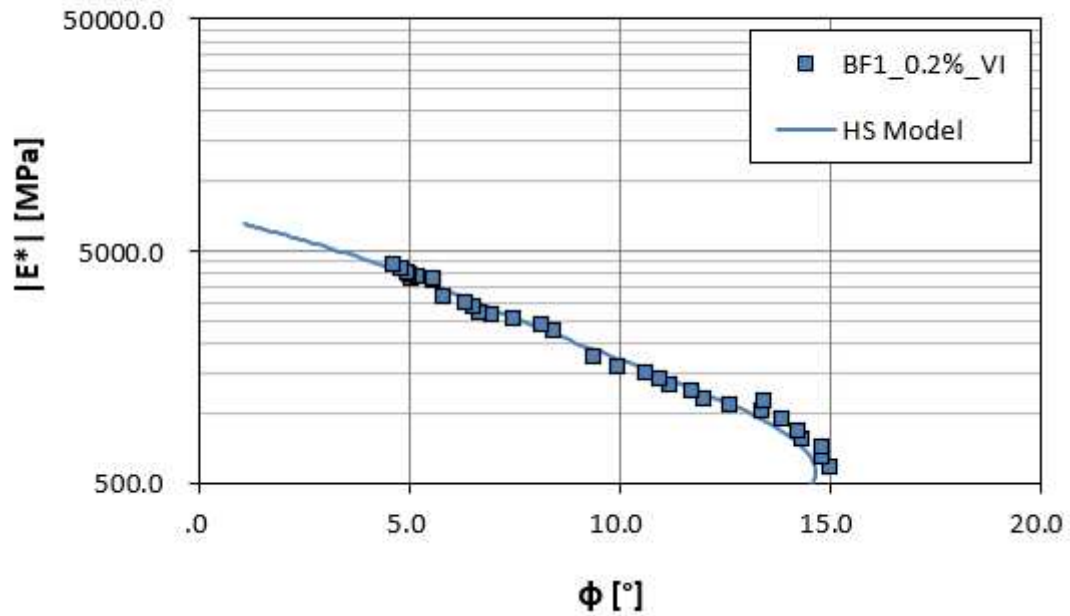


Figura 74 "Diagramma di Black del provino BF1_0.2%_VI"

Cole-Cole

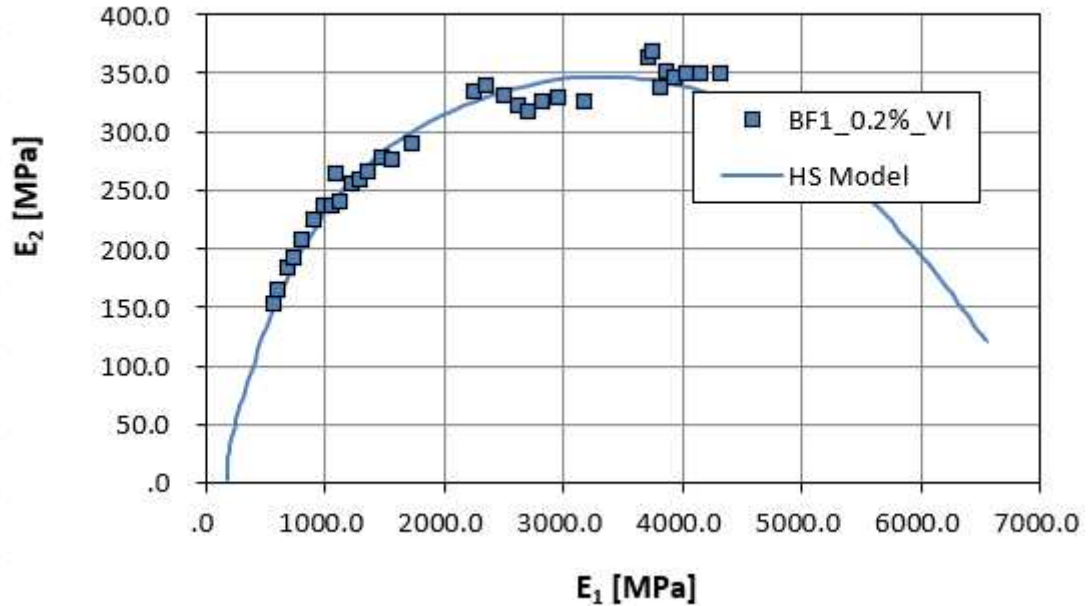


Figura 75 "Diagramma di Cole-Cole del provino BF1_0.2%_VI"

BF1_0.2%_VII				
Temperatura [°C]	Temp effettiva [°C]	Frequenza [Hz]	1° tentativo	
			E* [MPa]	δ [°]
5		20	4014	3.3
5		10	3869	4.34
5		5	3768	4.78
5	microstrain	2	3689	4.71
5	20-30	1	3643	4.64
5		0.5	3595	4.59
5		0.2	3482	5.09
5		0.1	3397	5.33
20		20	2867	5.21
20		10	2701	5.92
20		5	2609	6.04
20	microstrain	2	2480	6.06
20	20-30	1	2400	6.25
20		0.5	2306	6.59
20		0.2	2183	7.2
20		0.1	2095	7.5
35		20	1647	8.57
35		10	1562	9.16
35		5	1490	9.28
35		2	1396	9.69
35	microstrain 30-40	1	1333	10.08
35		0.5	1253	10.85
35		0.2	1145	11.7
35		0.1	1061	12.23
50		20	1070	11.78
50		10	995.3	11.93
50		5	921.2	12.33
50	microstrain 30-40	2	829.1	12.74
50		1	764.9	13.09
50		0.5	704.7	13.39
50		0.2	629.5	13.55
50		0.1	577	13.75

Tabella 30 "Risultati della prova di modulo complesso provino BF1_0.2%_VII"

Master Curves E^*

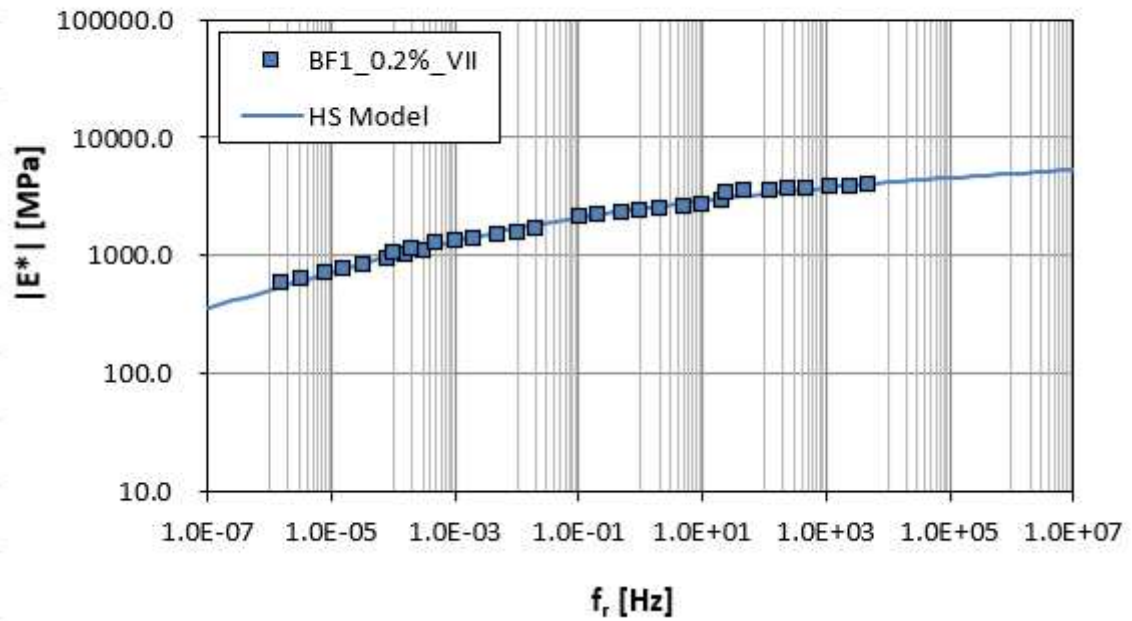


Figura 6 "Curva Maestra del Modulo Complesso del provino BF1_0.2%_VII"

Master Curves Φ

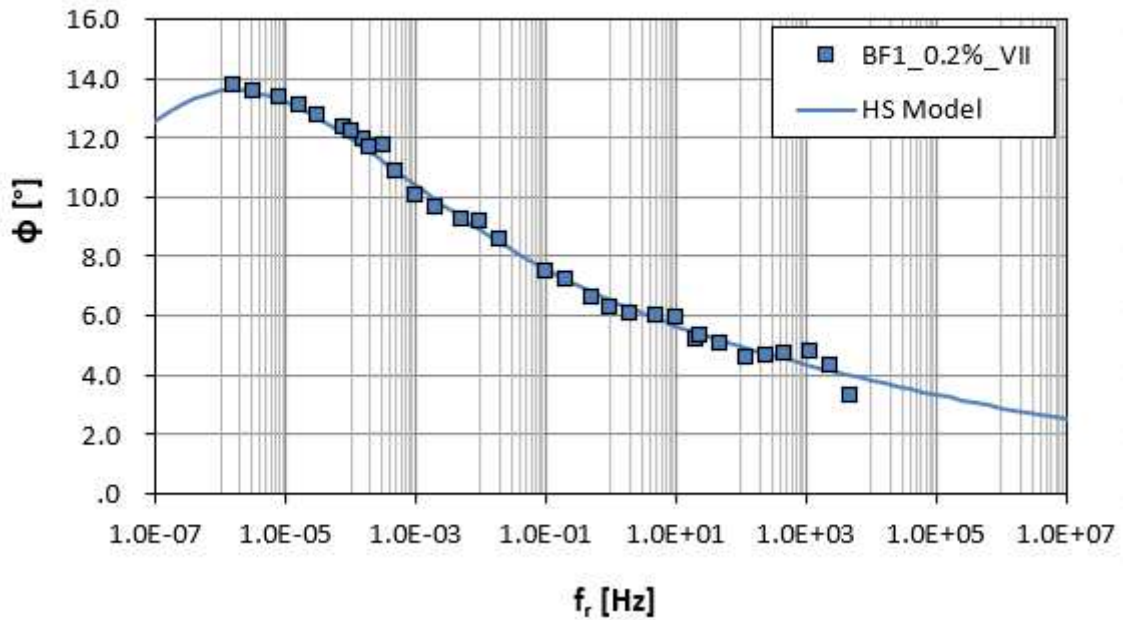


Figura 77 "Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino BF1_0.2%_VII"

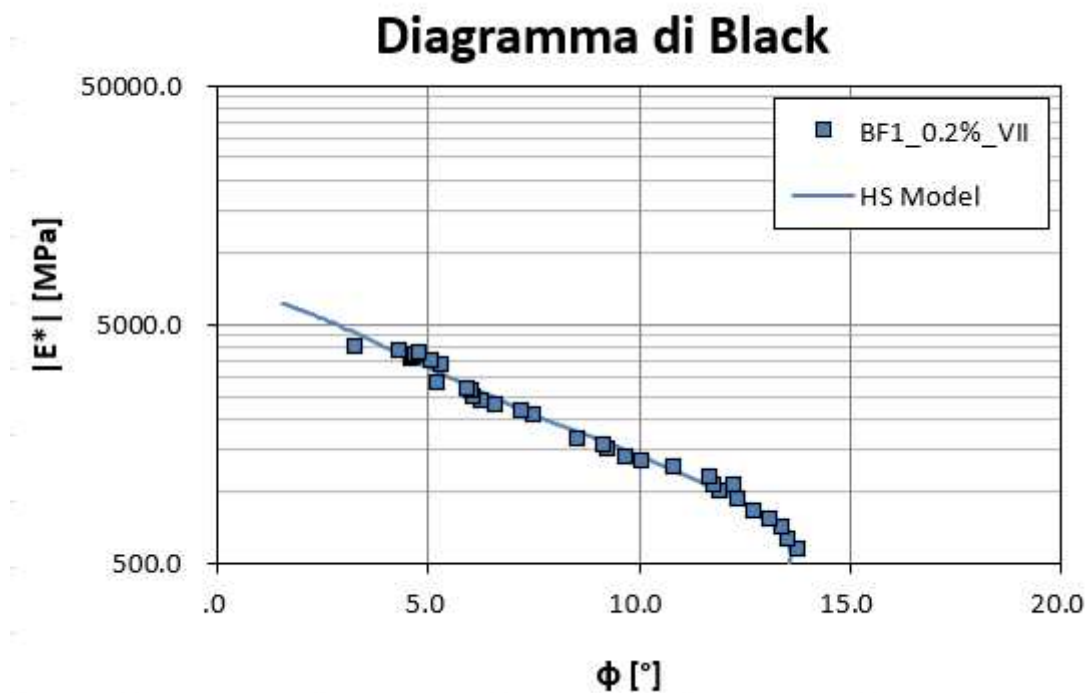


Figura 78 "Diagramma di Black del provino BF1_0.2%_VII"

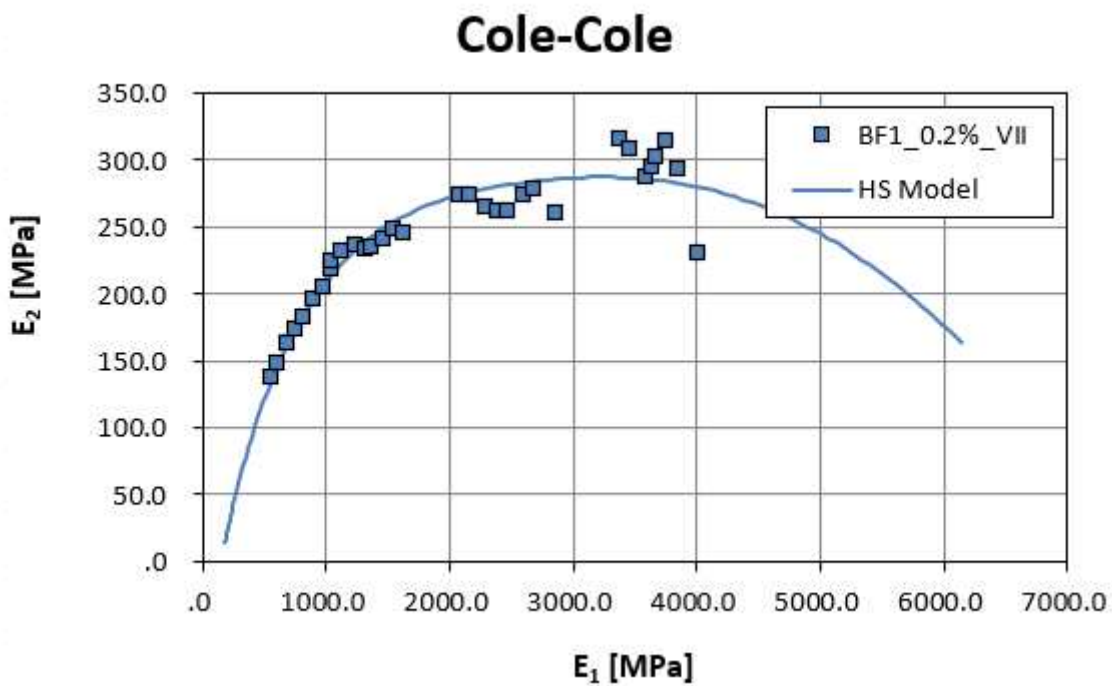


Figura 79 "Diagramma di Cole-Cole del provino BF1_0.2%_VII"

5.5.2. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA 2_0.2%

Per la miscela realizzata con la seconda fibra sono stati testati per tutte le temperature di prova i provini CF2_0.2%_VIII, CF2_0.2%_IX E CF2_0.2%_X.

BREVE TERMINE (30 gg)						
Codice	info	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h _m [mm]	D [mm]
CF2_0.2%_VIII	pre-spianat.	120.5	120.7	120.3	120.5	101
	post-spianat.	124.2	123.3	124.2	123.9	101
CF2_0.2%_IX	pre-spianat.	120	120.1	120.1	120.1	100.2
	post-spianat.	124.7	124.1	124.2	124.3	100.2
CF2_0.2%_X	pre-spianat.	120.7	120.8	120.2	120.3	100.1
	post-spianat.	122	123.6	123.8	123.1	100.1

Tabella 31 "Dimensioni geometriche dei provini dell'impasto CF2_0.2%"

CF2_0.2%_VIII				
Temperatura [°C]	Temp effettiva [°C]	Frequenza [Hz]	1° tentativo	
			E* [MPa]	δ [°]
5		20	5898	4.01
5		10	5759	4.47
5		5	5597	4.78
5	microstrain	2	5384	5.1
5	20-30	1	5233	5.3
5		0.5	5089	5.4
5		0.2	4904	5.45
5		0.1	4767	5.6
20		20	4388	5.63
20		10	4189	5.8
20		5	4020	6.12
20		2	3825	6.49
20	microstrain 20-30	1	3668	6.59
20		0.5	3528	6.96
20		0.2	3311	7.52
20		0.1	3149	7.94
35		20	2963	9.01
35		10	2778	9.68
35		5	2602	10.25
35		2	2380	11.07
35	microstrain 30-40	1	2214	11.68
35		0.5	2048	12.29
35		0.2	1838	12.9
35		0.1	1687	13.31
50		20	1959	12.52
50		10	1782	12.94
50		5	1619	13.33
50	microstrain 30-40	2	1435	13.76
50		1	1303	13.93
50		0.5	1186	14.11
50		0.2	1052	14.04
50		0.1	956.8	14.18

Tabella 32 "Risultati della prova di modulo complesso provino CF2_0.2%_VIII"

Master Curves E*

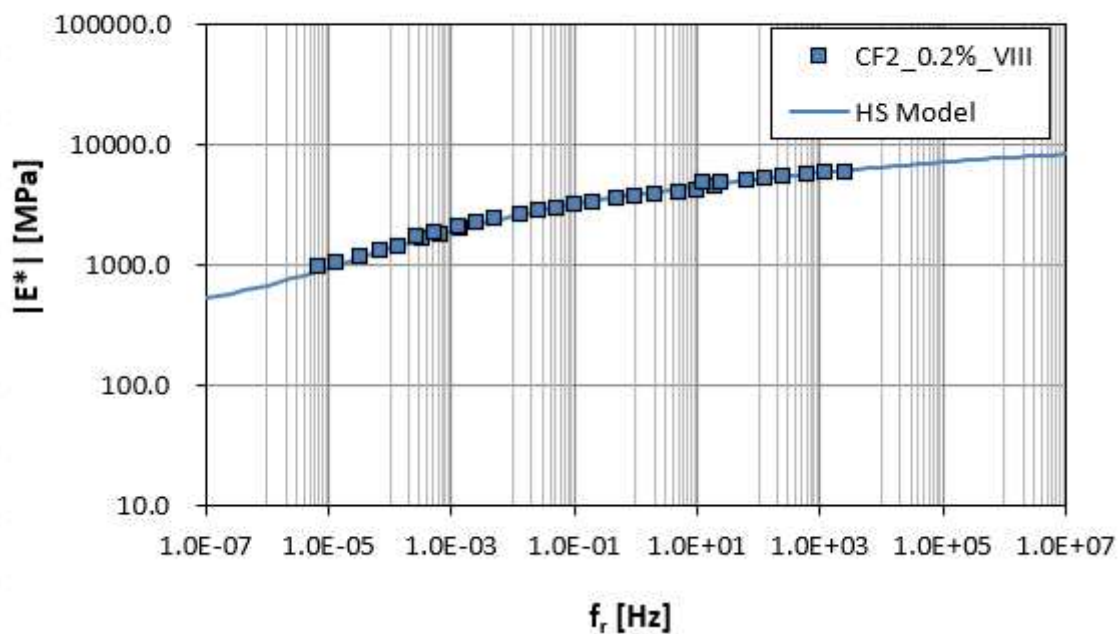


Figura 80 "Curva Maestra del Modulo Complesso del provino CF2_0.2%_VIII"

Master Curves Φ

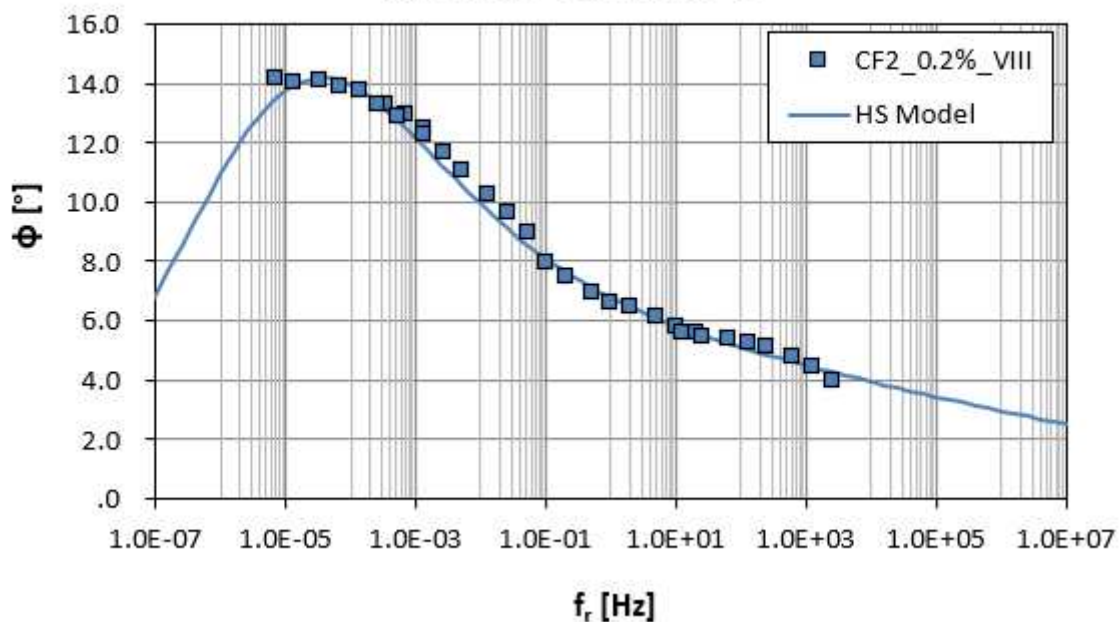


Figura 81 "Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino CF2_0.2%_VIII"

Diagramma di Black

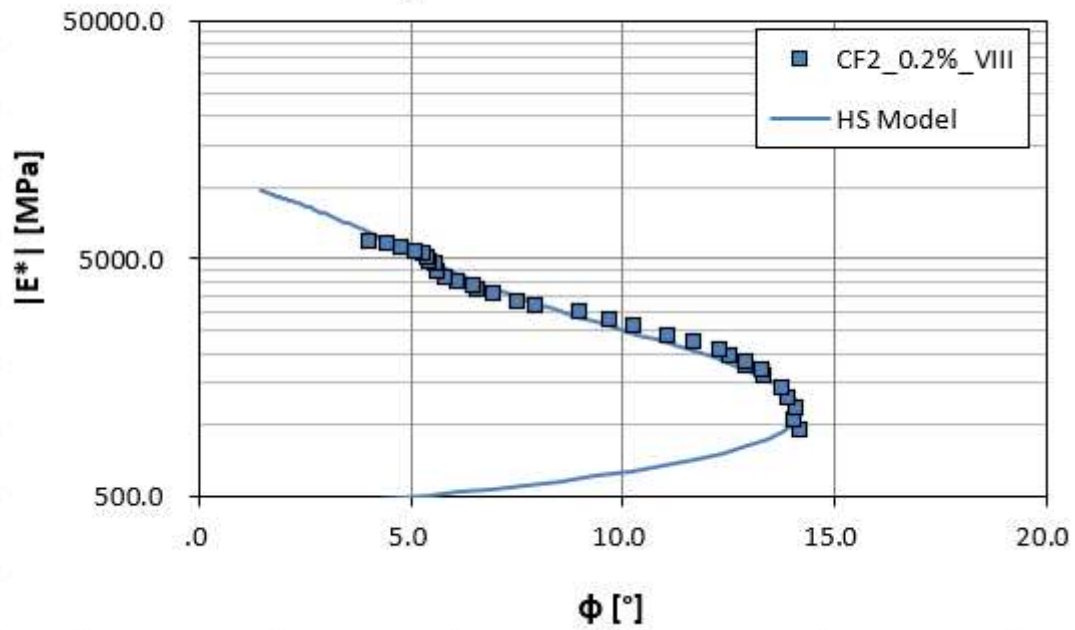


Figura 82 "Diagramma di Black del provino CF2_0.2%_VIII"

Cole-Cole

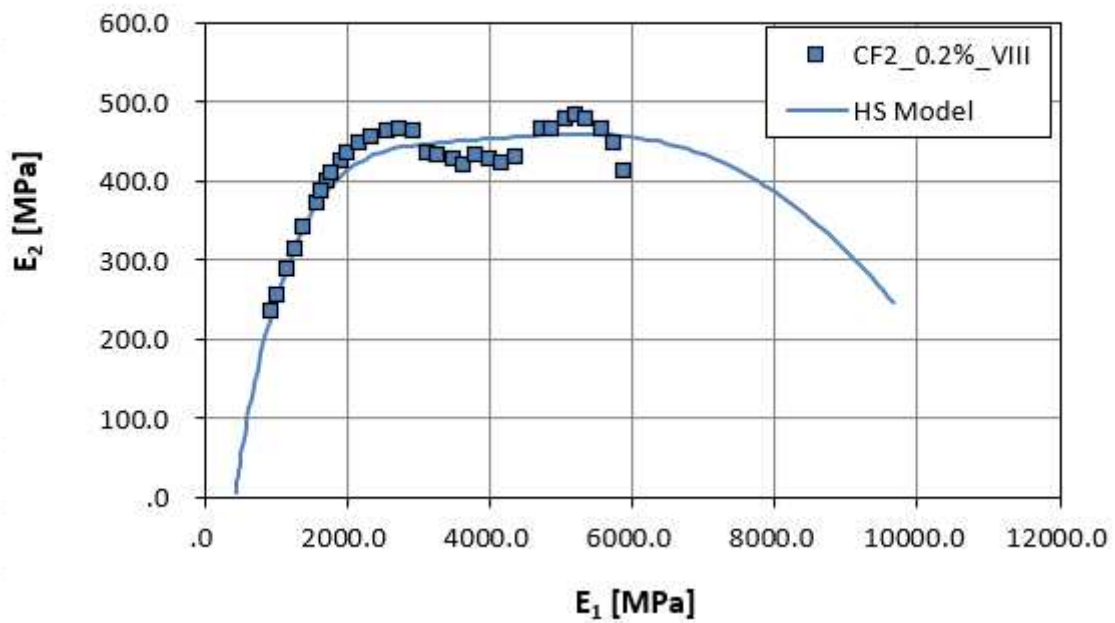


Figura 83 "Diagramma di Cole-Cole del provino CF2_0.2%_VIII"

CF2_0.2%_IX				
Temperatura [°C]	Temp effettiva [°C]	Frequenza [Hz]	1° tentativo	
			E* [MPa]	δ [°]
5		20	6410	2.63
5		10	6557	1.01
5		5	6638	0.94
5	microstrain	2	6521	1.05
5	20-30	1	6434	1.26
5		0.5	6270	2.01
5		0.2	6045	2.26
5		0.1	5829	2.79
20		20	4002	4.56
20		10	3812	4.82
20		5	3669	4.85
20	microstrain	2	3481	5.2
20	20-30	1	3316	5.82
20		0.5	3102	6.81
20		0.2	2843	7.8
20		0.1	2642	8.52
35		20	2033	10.85
35		10	1881	11.35
35		5	1747	11.56
35		2	1584	11.93
35	microstrain 30-40	1	1472	12.23
35		0.5	1370	12.72
35		0.2	1234	13.07
35		0.1	1144	13.65
50		20	1349	15.1
50		10	1193	14.94
50		5	1068	15.02
50	microstrain 30-40	2	931.1	15.39
50		1	838.6	15.14
50		0.5	759.7	15.47
50		0.2	667.2	15.16
50		0.1	606.2	15.81

Tabella 33 "Risultati della prova di modulo complesso provino CF2_0.2%_IX"

Master Curves E^*

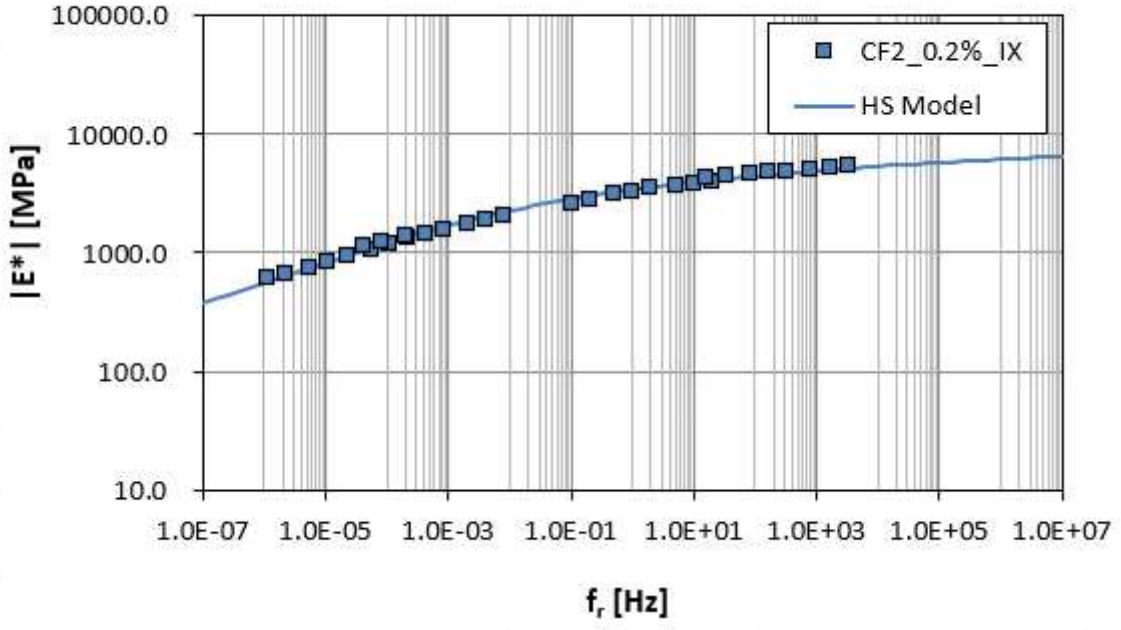


Figura 84 "Curva Maestra del Modulo Complesso del provino CF2_0.2%_IX"

Master Curves Φ

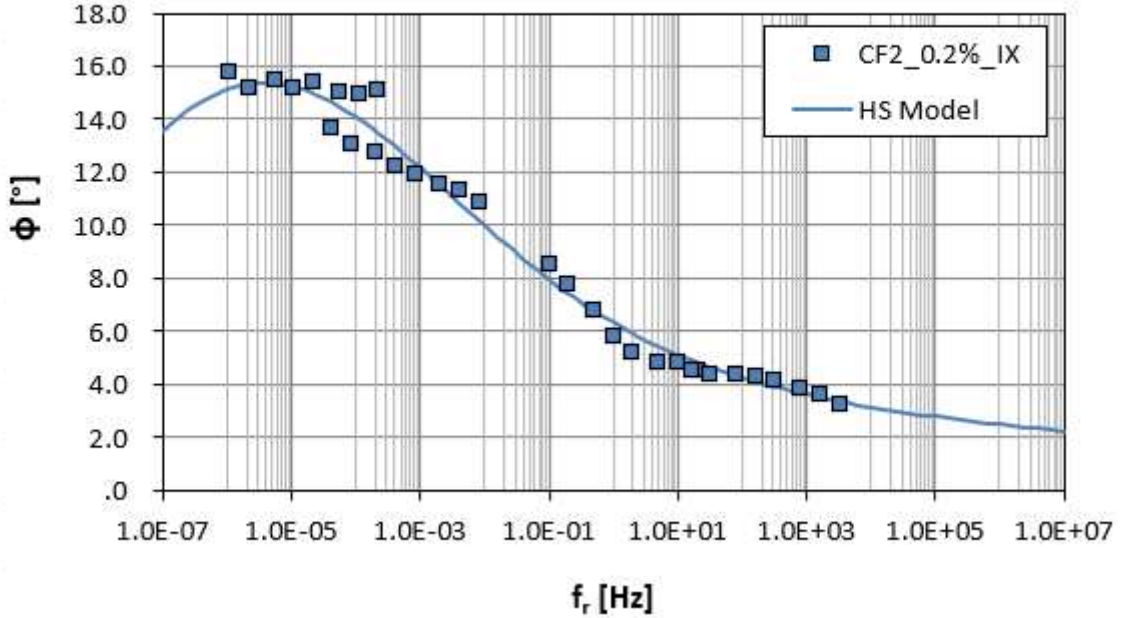


Figura 85 "Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino CF2_0.2%_IX"

Diagramma di Black

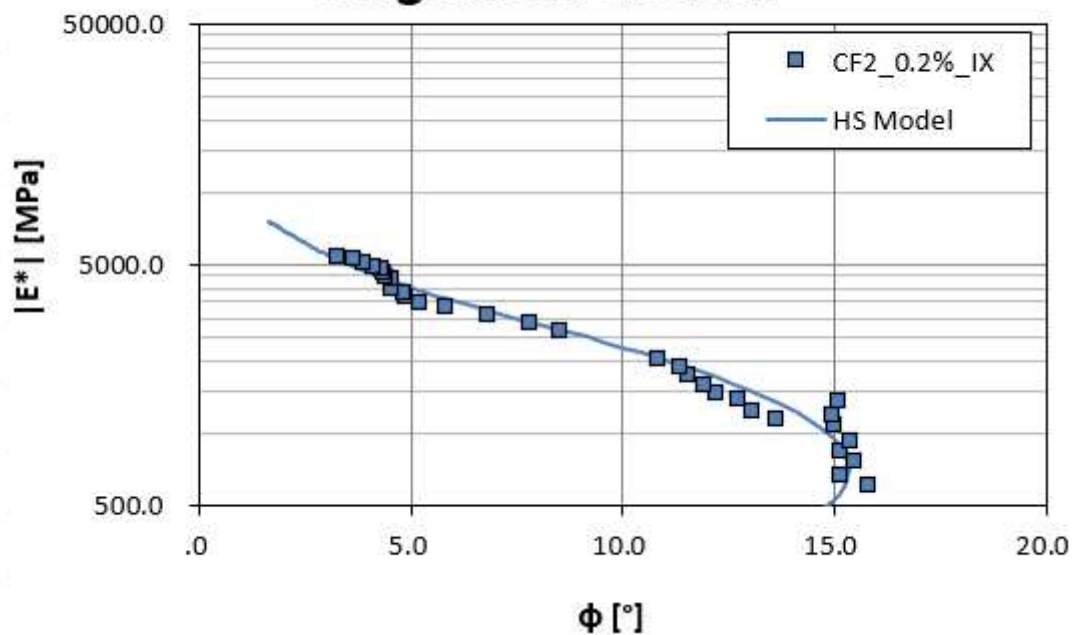


Figura 86 "Diagramma di Black del provino CF2_0.2%_IX"

Cole-Cole

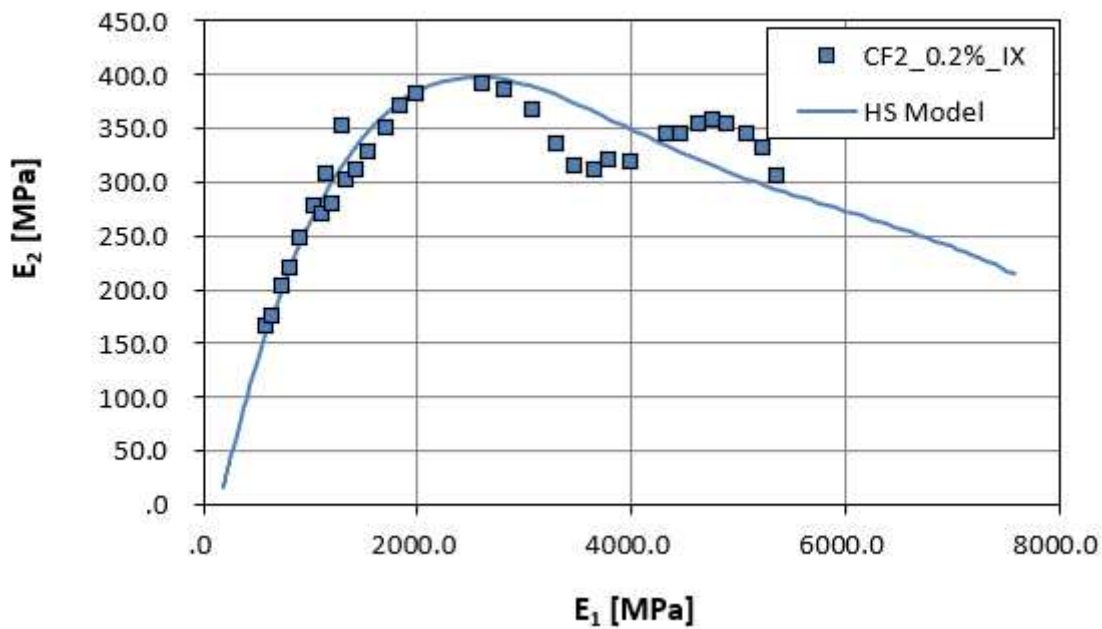


Figura 87 "Diagramma di Cole-Cole del provino CF2_0.2%_IX"

CF2_0.2%_X				
			1° tentativo	
Temperatura [°C]	Temp effettiva [°C]	Frequenza [Hz]	E* [MPa]	δ [°]
5		20	7772	1.17
5		10	7381	2.13
5		5	6949	2.52
5	microstrain	2	6504	3.14
5	20-30	1	6129	3.79
5		0.5	5813	4.49
5		0.2	5377	5.25
5		0.1	5043	5.79
20		20	4545	5.48
20		10	4194	6.02
20		5	3989	6.26
20	microstrain	2	3749	6.75
20	20-30	1	3568	7.29
20		0.5	3367	7.95
20		0.2	3093	8.64
20		0.1	2893	9.2
35		20	2414	9.91
35		10	2248	10.2
35		5	22099	10.56
35		2	1908	11.15
35	microstrain 30-40	1	1775	11.6
35		0.5	1636	12.08
35		0.2	1466	12.5
35		0.1	1343	13.01
50		20	1479	14.23
50		10	1323	14.44
50		5	1195	14.78
50	microstrain 30-40	2	1040	15.19
50		1	936.4	15.46
50		0.5	847.2	15.64
50		0.2	739.7	15.51
50		0.1	671.2	15.63

Tabella 34 "Risultati della prova di modulo complesso provino CF2_0.2%_X"

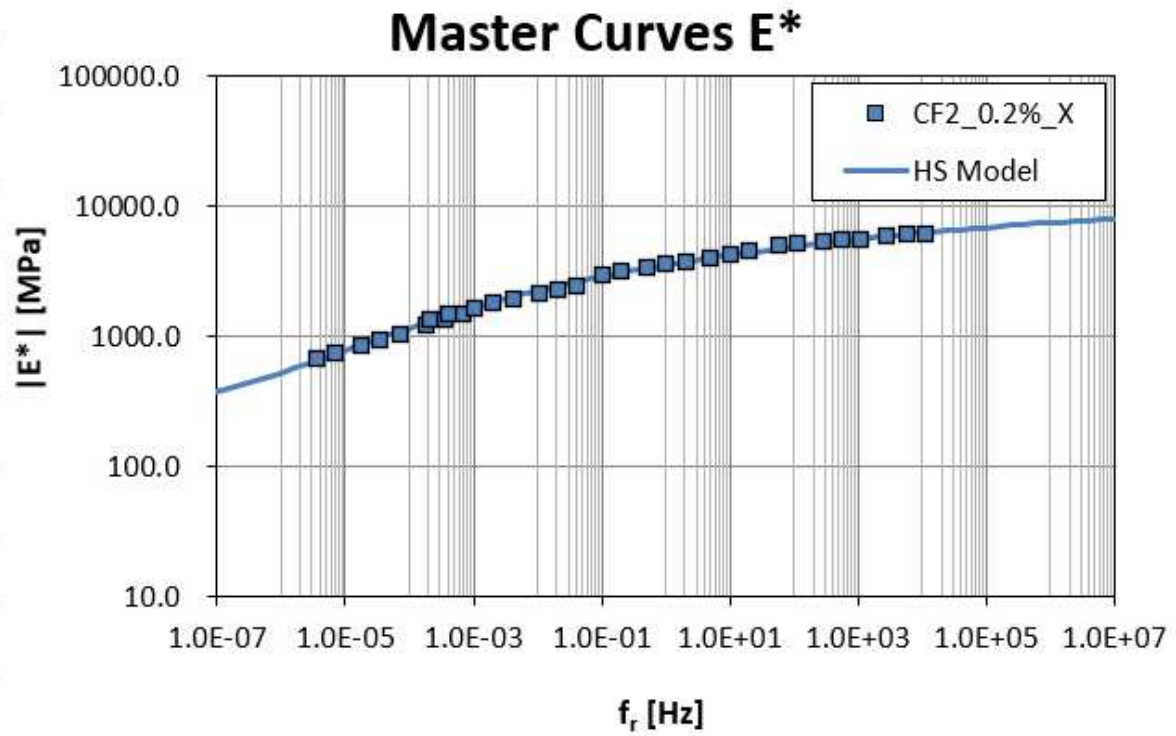


Figura 88 "Curva Maestra del Modulo Complesso del provino CF2_0.2%_X"

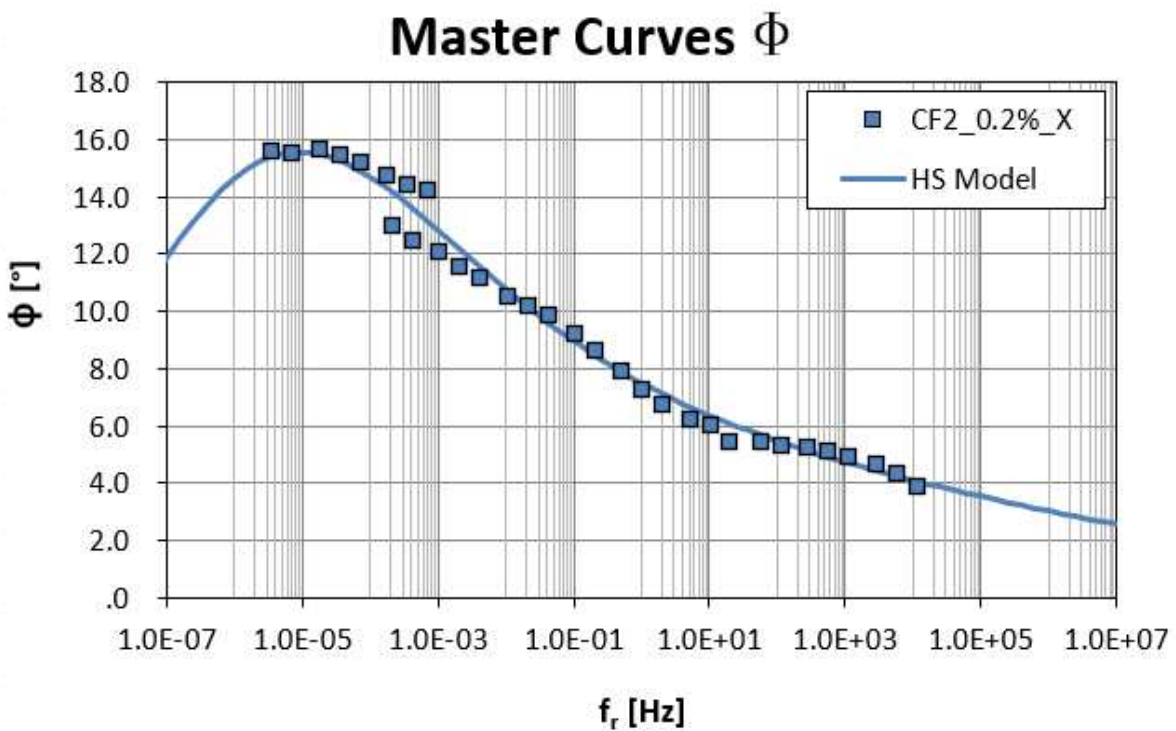


Figura 89 "Curva Maestra dell'Angolo di Fase del provino CF2_0.2%_X"

Diagramma di Black

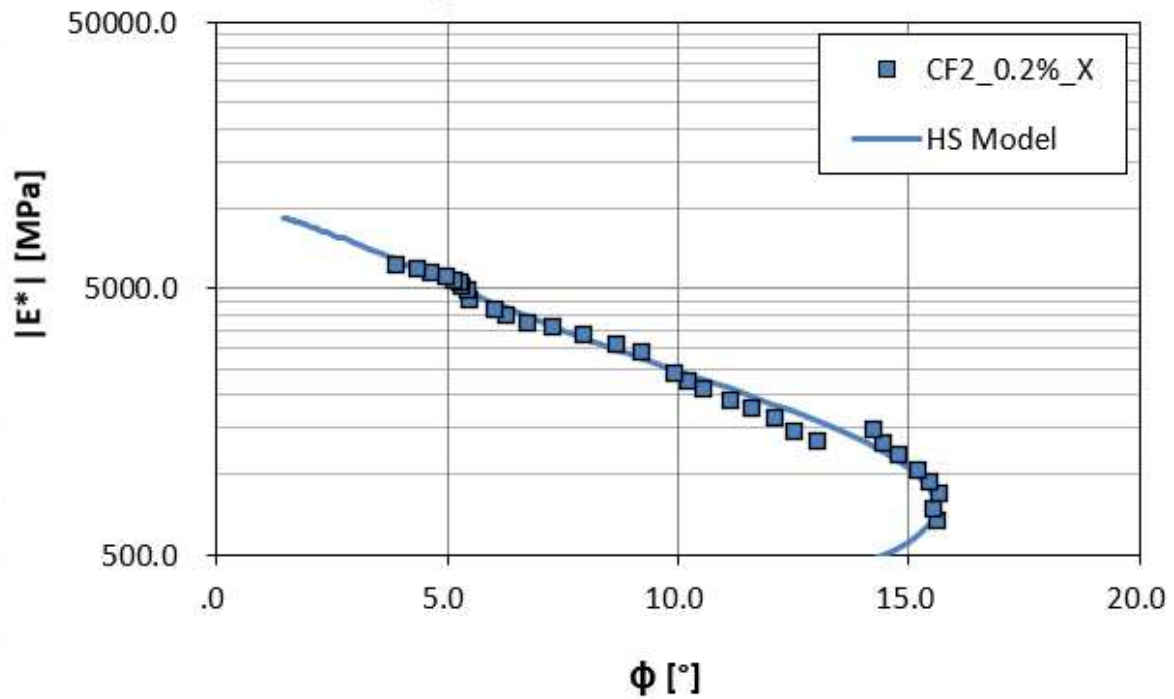


Figura 90 "Diagramma di Black del provino CF2_0.2%_X"

Cole-Cole

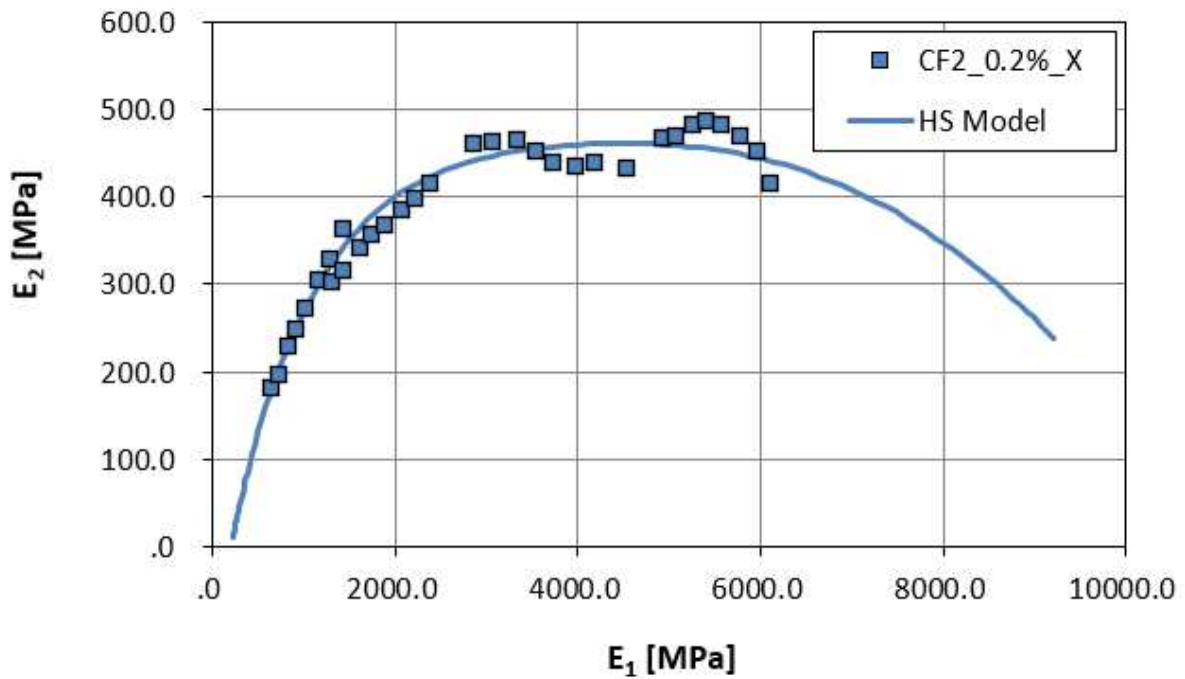


Figura 91 "Diagramma di Cole-Cole del provino CF2_0.2%_X"

5.6. ITFT

Le prove di fatica sono state effettuate solo su alcuni provini avente numerazione romana. Di seguito si riportano i risultati mediante tabelle e grafici. I valori in rosso nelle successive tabelle si riferiscono a risultati di prove che non sono inseriti nell'elaborazione dei dati poiché fuori trend generale.

5.6.1. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.2%

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{\text{effettivo}}$ [MPa]	ϵ_{115}	n° cicli
AF1_0.2%_I_sup	56.7	100.3	4116	200	115	223300
AF1_0.2%_I_inf	56.9	100.4	4972	275	202	1915
AF1_0.2%_II_sup	56.2	100.1	3613	185	129	34000
AF1_0.2%_II_inf	56.9	100.5	4684	215	140	21000
AF1_0.2%_III_sup	56.8	100.0	4034	225	185	2500
AF1_0.2%_III_inf	56.2	100.0	4560	215	141	47500
AF1_0.2%_IV_sup	56.8	100.0	3602	150	120	108500
AF1_0.2%_IV_inf	55.9	100.2	4131	250	187	2320
CF1_0.2%_VIII_sup	60.1	99.9	2465	100	115	220500
CF1_0.2%_VIII_inf	60.2	100.0	3494	200	214	2425
CF1_0.2%_IX_sup	60.1	100.0	3105	175	546	1500
CF1_0.2%_IX_inf	60.4	99.4	3589	165	172	65500
CF1_0.2%_X_sup	59.0	99.9	2945	115	132	15250
CF1_0.2%_X_inf	59.5	100.2	3302	150	132	17500

Tabella 35 "Risultati prove di fatica provini dell'impasto con fibra1_0.2%"

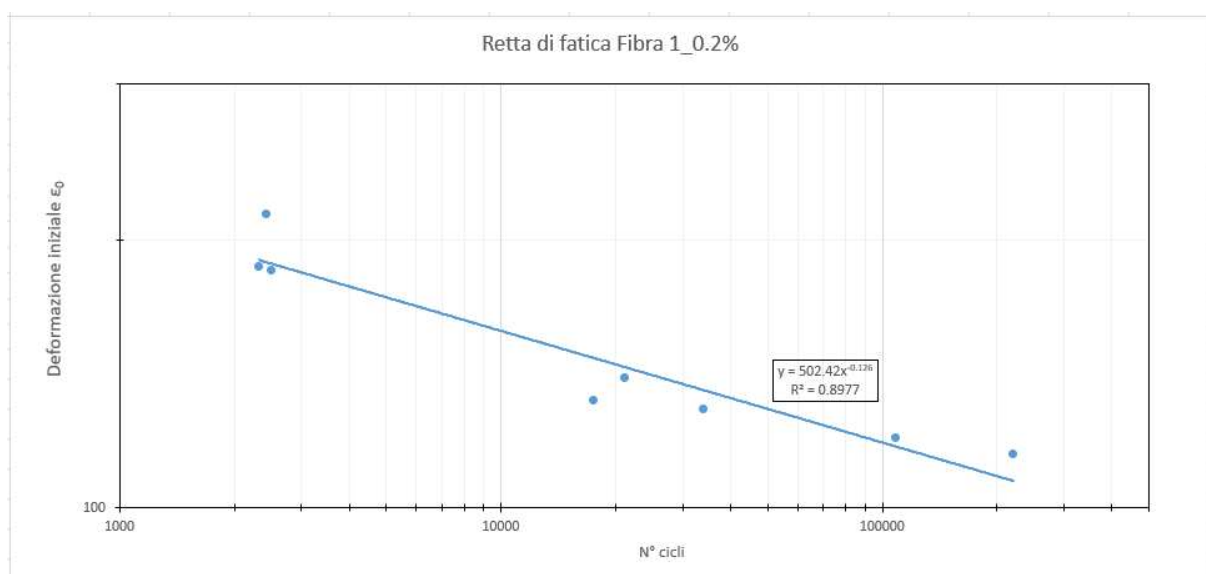


Figura 92 "Retta di fatica bi-logaritmica (N° cicli; ϵ_0), Provini dell'impasto con fibra1_0.2%"

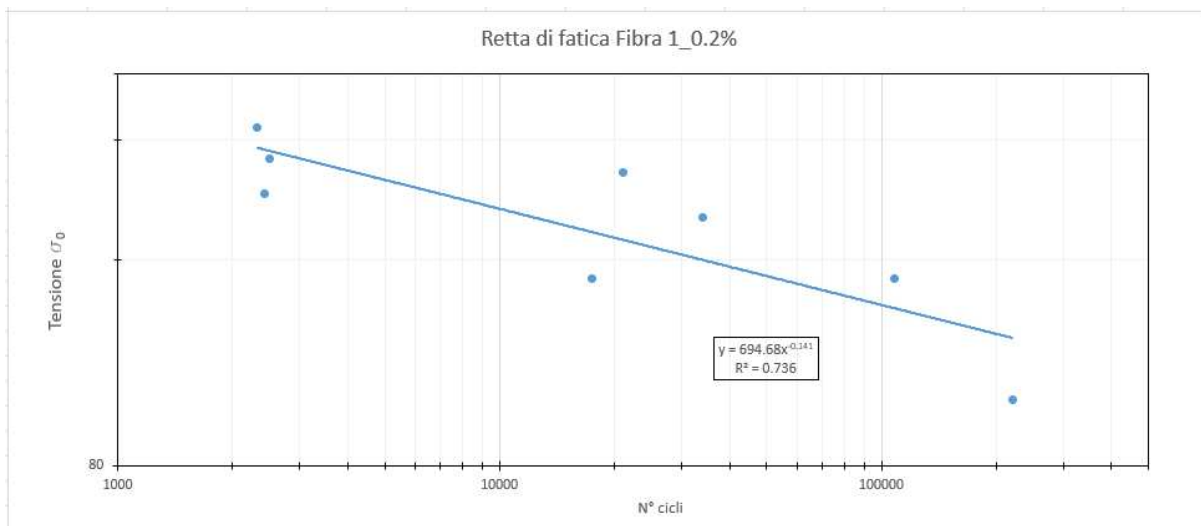


Figura 93 "Retta di fatica bi-logaritmica (N°cicli; σ_0), Provini dell'impasto con fibra1_0.2%"

5.6.2. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA1_0.1%

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{\text{effettivo}}$ [MPa]	ϵ_{115}	n° cicli
AF1_0.1%_I_sup	59,7	100,2	4498	185	110	297000
AF1_0.1%_I_inf	59,7	100,1	6116	400	222	1233
AF1_0.1%_II_sup	60,1	99,6	4736	215	139	22500
AF1_0.1%_II_inf	59,3	99,9	5927	375	192	2557
AF1_0.1%_III_sup	59,9	100,0	4573	215	123	350000
AF1_0.1%_III_inf	59,6	100,0	4737	240	146	81500
AF1_0.1%_IV_sup	60,3	100,1	4873	235	123	23300
AF1_0.1%_IV_inf	59,9	99,9	5052	250	193	24500

Tabella 36 "Risultati prove di fatica provini dell'impasto con fibra1_0.1%"

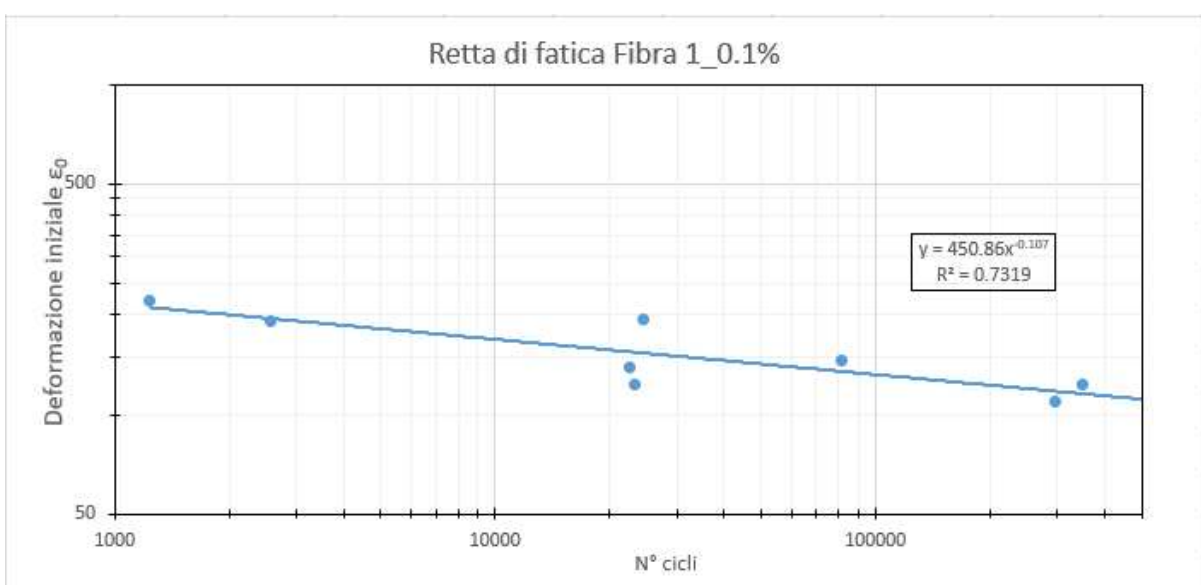


Figura 94 "Retta di fatica bi-logaritmica (N°cicli; ϵ_0), Provini dell'impasto con fibra1_0.1% con numeri romani"

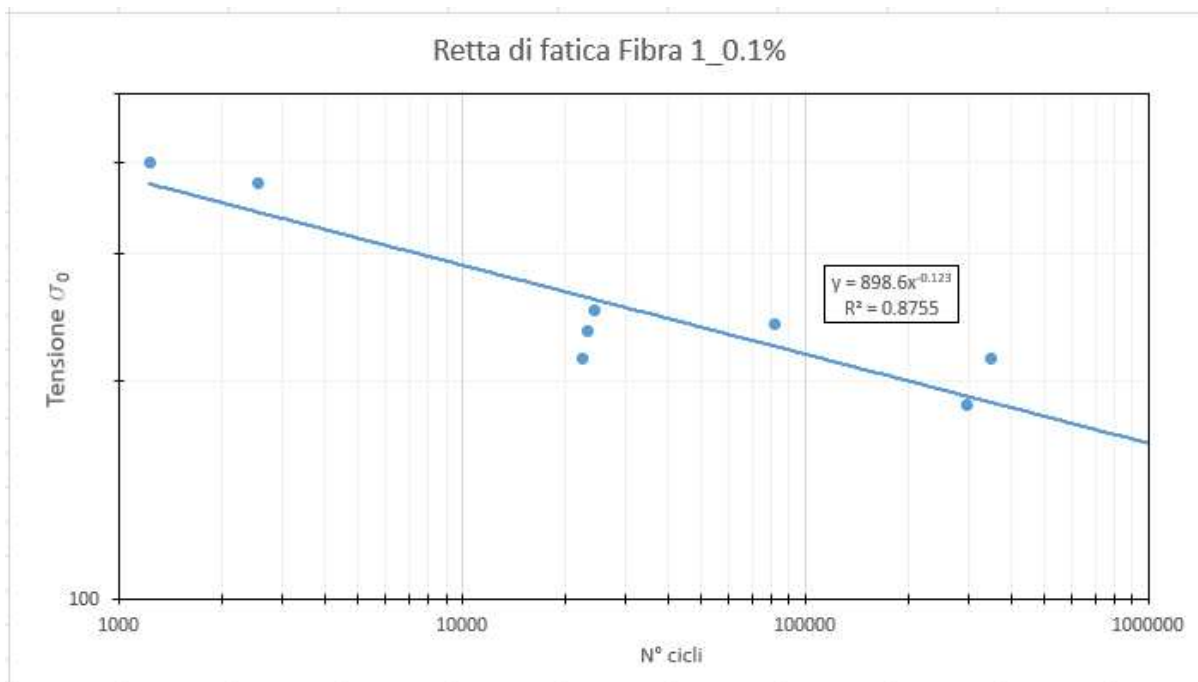


Figura 95 "Retta di fatica bi-logaritmica (N°cicli; σ_0), Provini dell'impasto con fibra1_0.1%"

5.6.3. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.2%

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{\text{effettivo}}$ [MPa]	ϵ_{115}	n° cicli
AF2_0.2%_I_sup	56,2	100,0	3431	160	148	75500
AF2_0.2%_I_inf	55,4	100,0	4553	275	227	3500
AF2_0.2%_II_sup	56,6	100,2	3866	200	199	5880
AF2_0.2%_II_inf	56,0	100,2	3427	170	134	368000
AF2_0.2%_III_sup	55,6	100,2	2907	135	110	695757
AF2_0.2%_III_inf	55,6	100,1	3228	140	120	90500
BF2_0.2%_IV_sup	56,0	100,1	4037	255	204	13500
BF2_0.2%_IV_inf	56,3	100,1	4909	285	227	29000
BF2_0.2%_V_sup	55,9	99,8	4092	235	172	42000
BF2_0.2%_V_inf	56,0	100,0	4238	215	152	34500
BF2_0.2%_VI_sup	55,8	100,2	3646	190	120	181000
BF2_0.2%_VI_inf	56,1	100,2	4267	240	229	4000
BF2_0.2%_VII_sup	56,4	100,3	3766	-	-	-
BF2_0.2%_VII_inf	56,4	100,3	4266	220	172	24000

Tabella 37 "Risultati prove di fatica provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

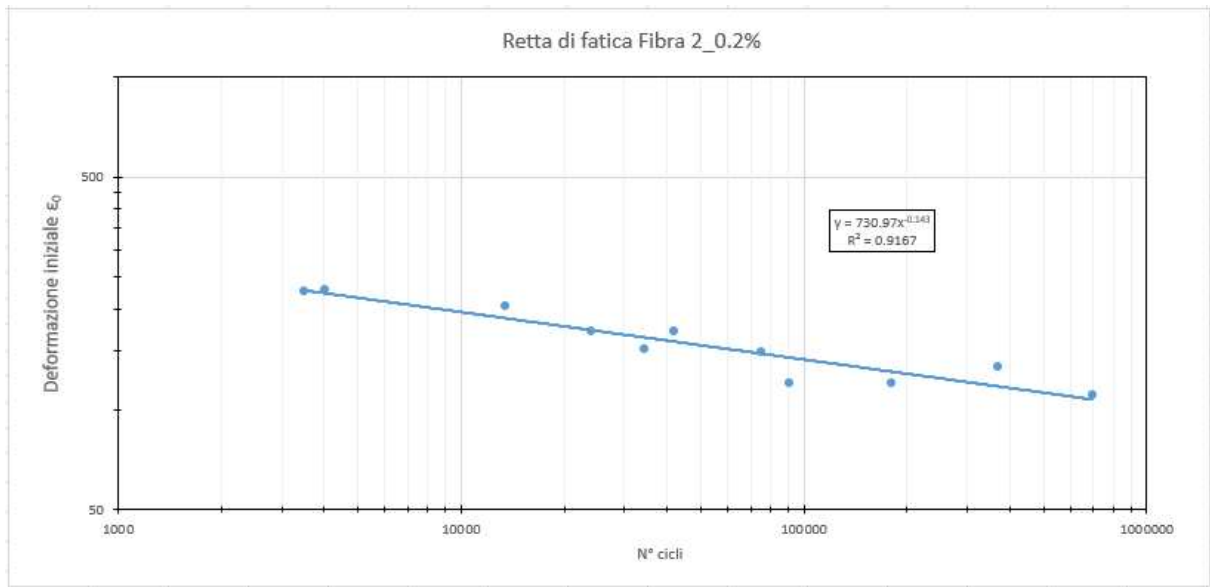


Figura 96 "Retta di fatica bi-logaritmica (N° cicli; ϵ_0), Provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

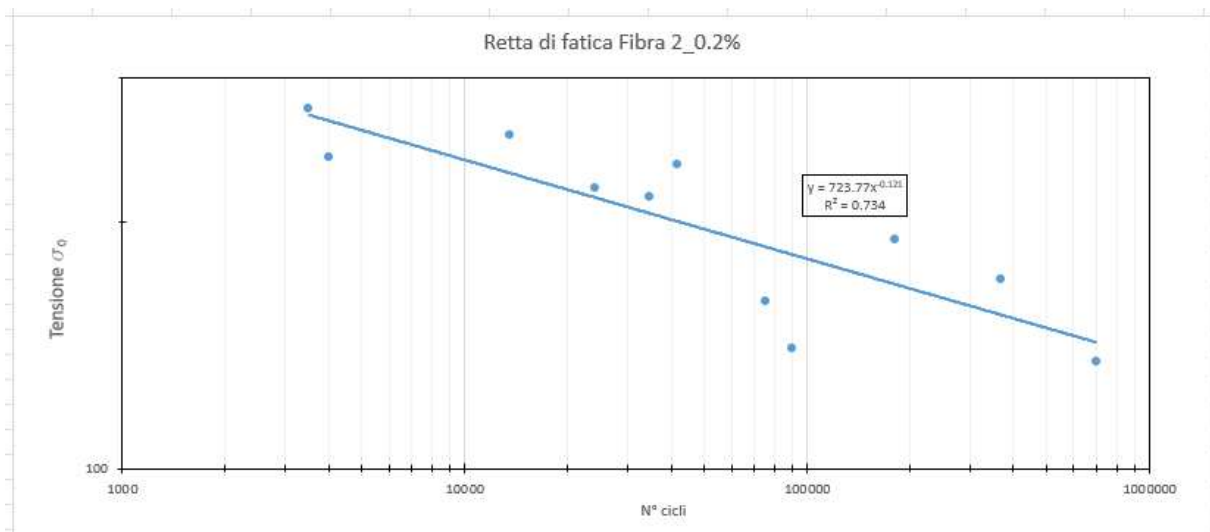


Figura 97 "Retta di fatica bi-logaritmica (N° cicli; σ_0), Provini dell'impasto con fibra2_0.2%"

5.6.4. PROVINI DELL'IMPASTO CON FIBRA2_0.1%

Codice	h_m [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{\text{effettivo}}$ [MPa]	ϵ_{115}	n° cicli
AF2_0.1%_I_sup	56,1	99,8	2447	185	114	297000
AF2_0.1%_I_inf	57,0	99,8	4694	350	834	500
AF2_0.1%_II_sup	56,0	100,1	3434	170	104	920500
AF2_0.1%_II_inf	55,9	100,1	4159	200	125	117500
AF2_0.1%_III_sup	56,8	100,1	4240	200	145	12450
AF2_0.1%_III_inf	56,8	100,2	4270	210	168	6200
AF2_0.1%_IV_sup	55,8	100,6	4272	275	1017	418
AF2_0.1%_IV_inf	56,3	100,2	4540	225	181	2000

Tabella 38 "Risultati prove di fatica provini dell'impasto con fibra2_0.1%"

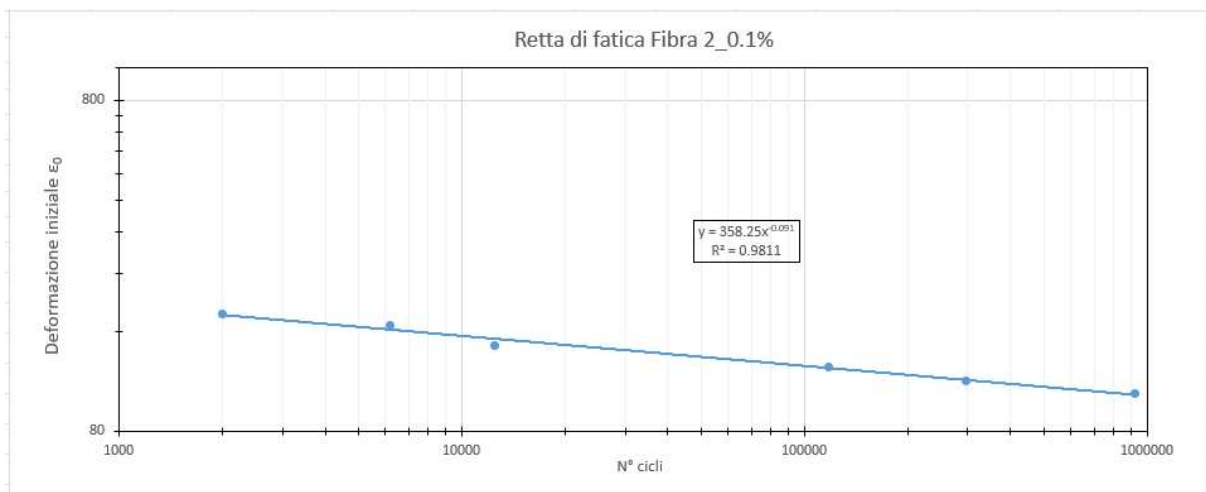


Figura 98 "Retta di fatica bi-logaritmica (N°cicli; ϵ_0), Provini dell'impasto con fibra2_0.1%"

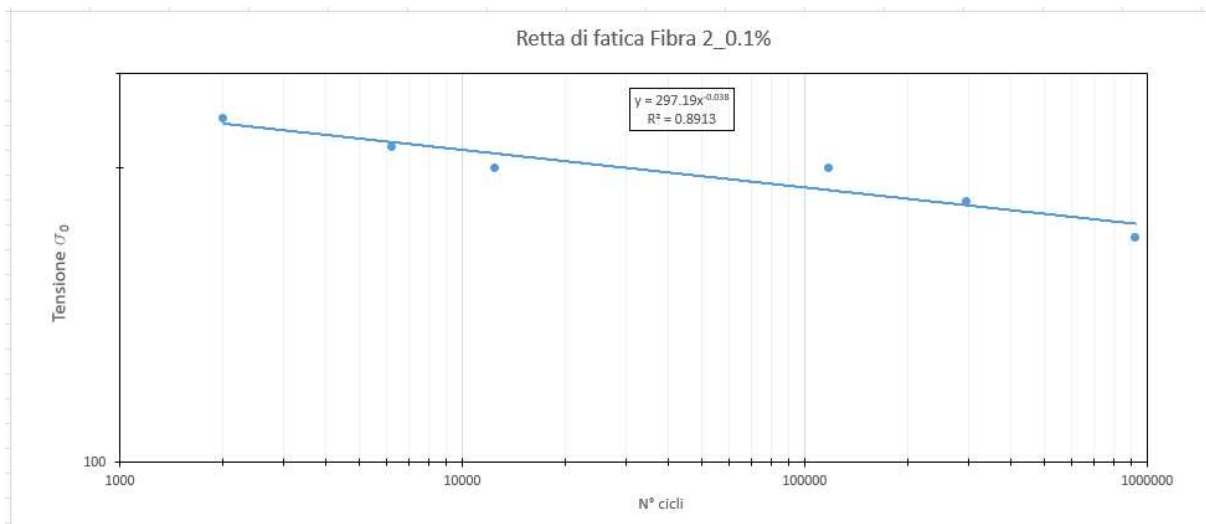


Figura 99 "Retta di fatica bi-logaritmica (N°cicli; σ_0), Provini dell'impasto con fibra2_0.1%"

5.7. CONFRONTI

5.7.1. VUOTI

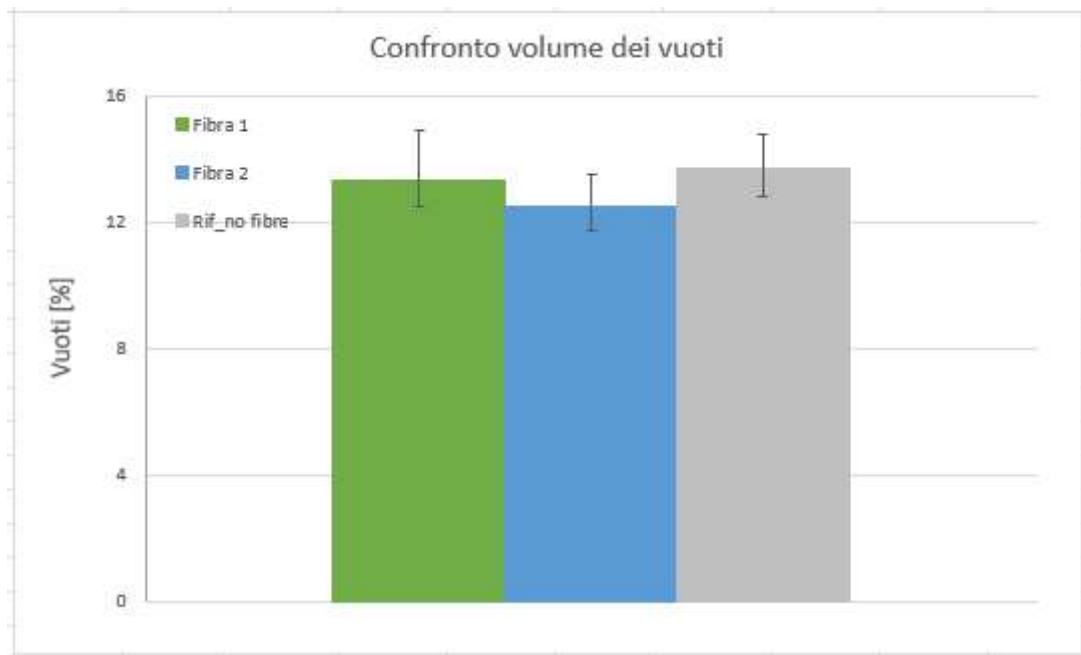


Figura 100 "Confronto volume dei vuoti dei vari impasti"

Dal precedente istogramma sono state messe a confronto le percentuali dei vuoti presenti nell'impasto di riferimento, impasto con fibra1_0.2% e fibra2_0.2%. Si nota che l'impasto di riferimento privo di fibre ha una percentuale di vuoti confrontabile a quella di fibra1_0.2% (13-13.5%), ma superiore all'impasto con fibra2_0.2% (12-12.5%).

5.7.2. ITSM

Prima di tutto sono stati confrontati i valori di ITSM pre-fatica delle diverse miscele (fig. 4) realizzate (due diverse fibre e due diversi dosaggi) sui provini di diametro 100 mm dopo il carotaggio (a 30 giorni).

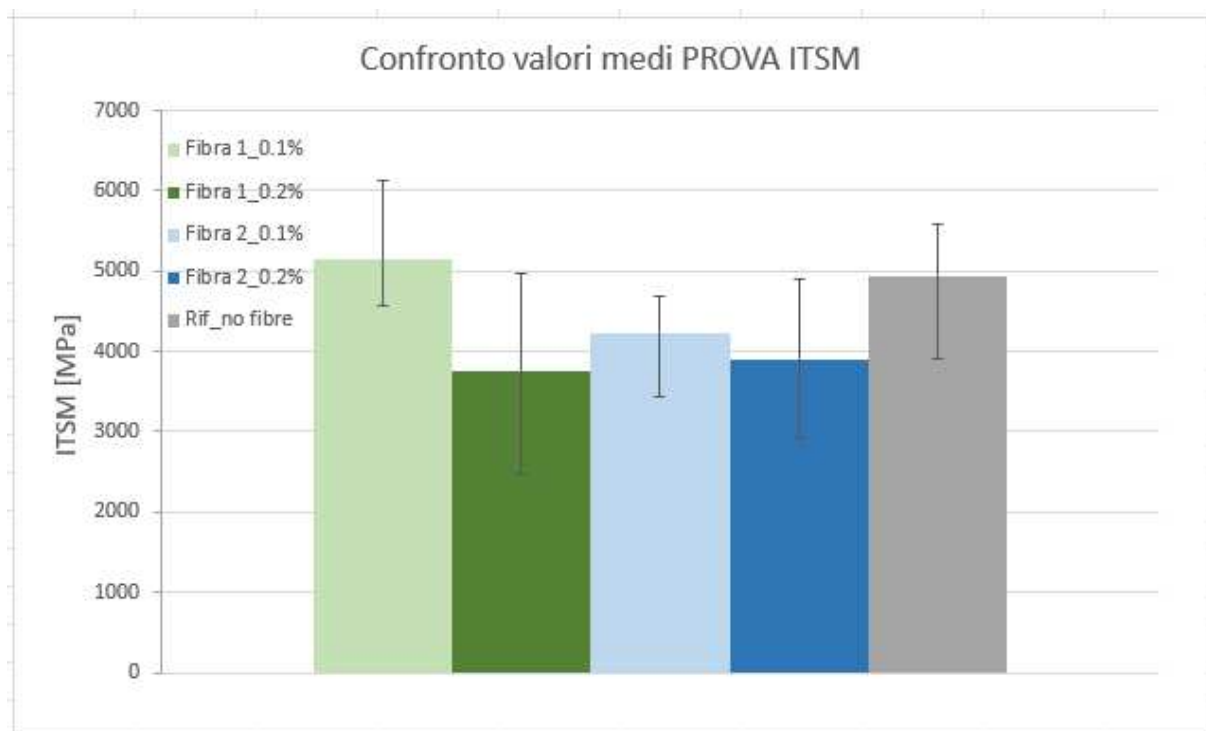


Figura 101 "Confronto dei valori medi ITSM per tutte le tipologie di impasto a 30 giorni di maturazione"

Da questo grafico è possibile osservare l'influenza della percentuale di fibre e della tipologia sul modulo di rigidezza dell'impasto. Prima di tutto è bene osservare che l'inserimento di fibre in generale comporta una riduzione della rigidezza di circa 1000 MPa, tranne nel caso delle fibre 1 allo 0.1%. L'incremento della percentuale è poi deleterio per la fibra 1, dove si ha una perdita di rigidezza del 20-25% raddoppiando il contenuto di fibra, mentre nel caso delle fibre 2 non si osservano cambiamenti al variare delle percentuali di fibre.

Un secondo confronto in termini di rigidezza è stato fatto al variare del grado di maturazione (Figure 2 e 3) tra le diverse tipologie di fibre (stessa percentuale di fibre, 0.2%). Questa valutazione è stata effettuata su provini di 150 mm di diametro.

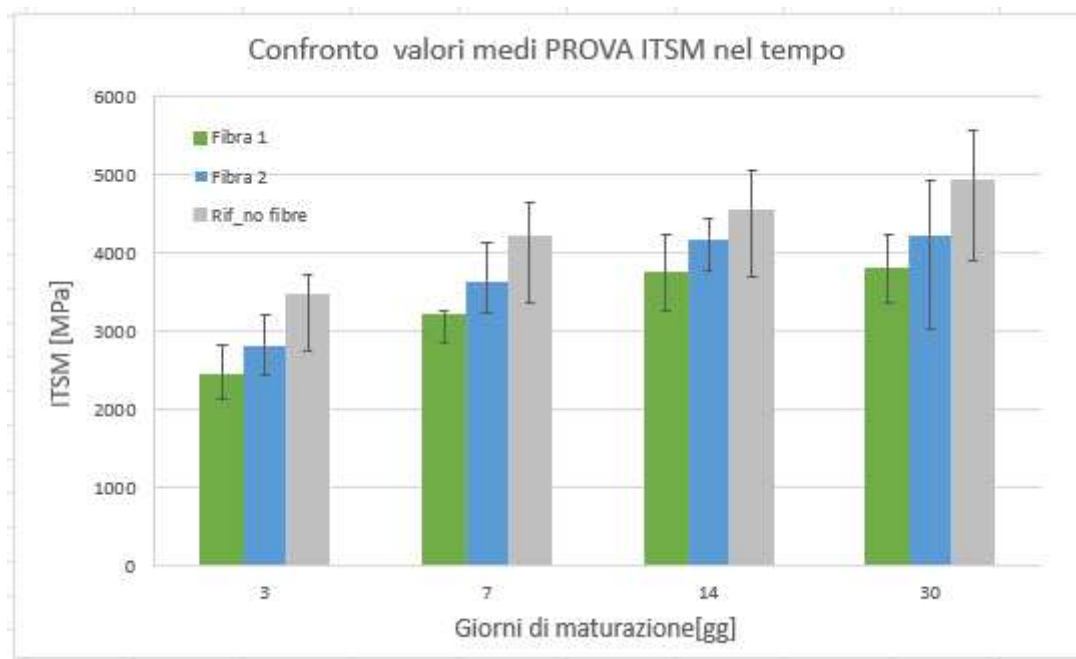


Figura 102 "Confronto risultati PROVA ITSM all'avanzare della maturazione"

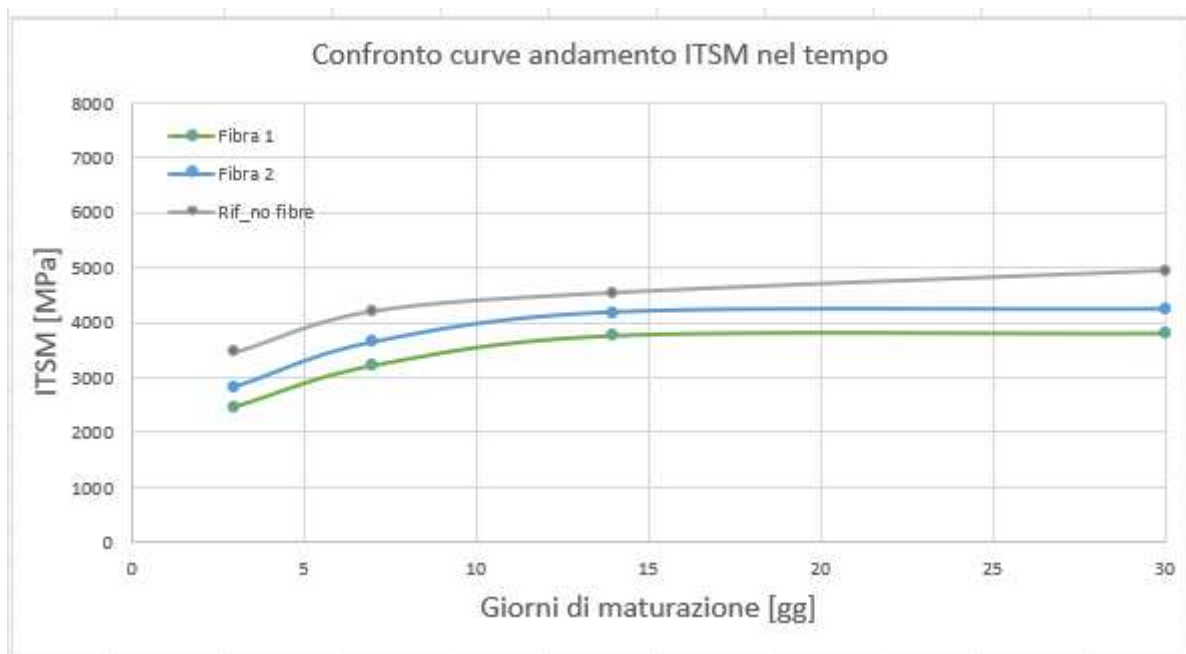


Figura 103 "Confronto curve ITSM dei vari impasti all'avanzare della maturazione"

Dai grafici precedenti è possibile affermare che i valori di modulo di rigidezza sono maggiori per i provini realizzati con l'impasto di riferimento privo di fibre, poi segue l'impasto con fibra 2 ed infine l'impasto con fibra 1. Ciò sta a significare che la presenza di fibre tende a ridurre il modulo di rigidezza dei vari provini, in modo più significativo la fibra 1. Si osserva, inoltre, come il modulo di rigidezza cresca repentinamente tra 3 e 7 giorni di maturazione e poi tenda quasi ad un asintoto orizzontale.

5.7.3. ITS

La prova ITS è stata effettuata solo su provini con numeri naturali. Nei successivi grafici è possibile osservare come dopo 3 giorni di maturazione si abbiano i migliori risultati della prova ITS per provini realizzati con la fibra 2 (0.43 MPa), a seguire provini di riferimento (0.38 MPa) ed infine provini contenenti fibra 1 (0.28 MPa). All'avanzare della maturazione questo trend si inverte rimanendo poi monotono, in modo da avere i migliori risultati forniti dai provini di riferimento ed i peggiori con la fibra 1. Dopo 30 giorni di maturazione la fibra 1 mostra il 25% in meno di resistenza rispetto al riferimento, mentre la fibra 2 l'8% in meno.

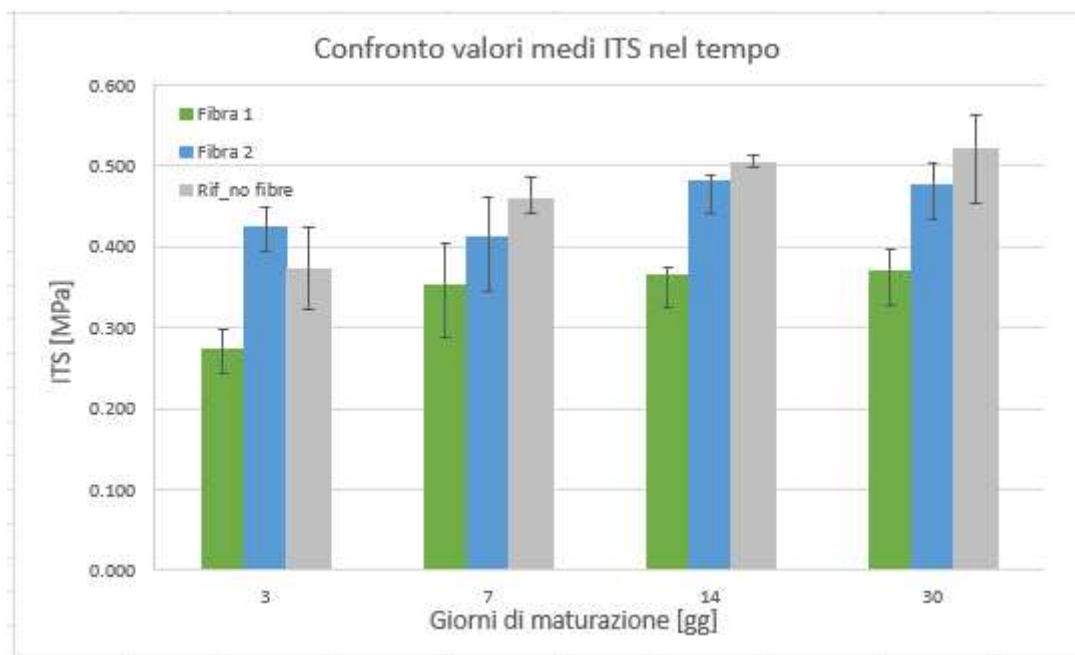


Figura 104 "Confronto valori medi ITS nel tempo"



Figura 105 "Confronto curve andamento ITS nel tempo"

Successivamente si mostrano i confronti dei valori medi CTI e CTI-index all'avanzare della maturazione. Iniziando dal coefficiente CTI, si può constatare che l'impasto di riferimento privo di fibre è quello che ci restituisce risultati migliori dopo 3 giorni, mentre i provini con fibra 1 i risultati peggiori. Questo trend rimane monotono fino ai 30 giorni di maturazione, quando si osserva che i valori medi di CTI più bassi sono quelli relativi ai provini con fibra 2, mentre i migliori risultati si ottengono sempre con i provini di riferimento. Per quanto concerne il CTI-index si hanno risultati migliori con i provini contenenti fibra 2 da 3 fino a 14 giorni di maturazione (circa 4-5 volte superiori). I risultati peggiori sono restituiti da provini di riferimento dai 3 ai 14 giorni di maturazione, mentre ai 30 giorni sono restituiti dai provini con fibra 1.

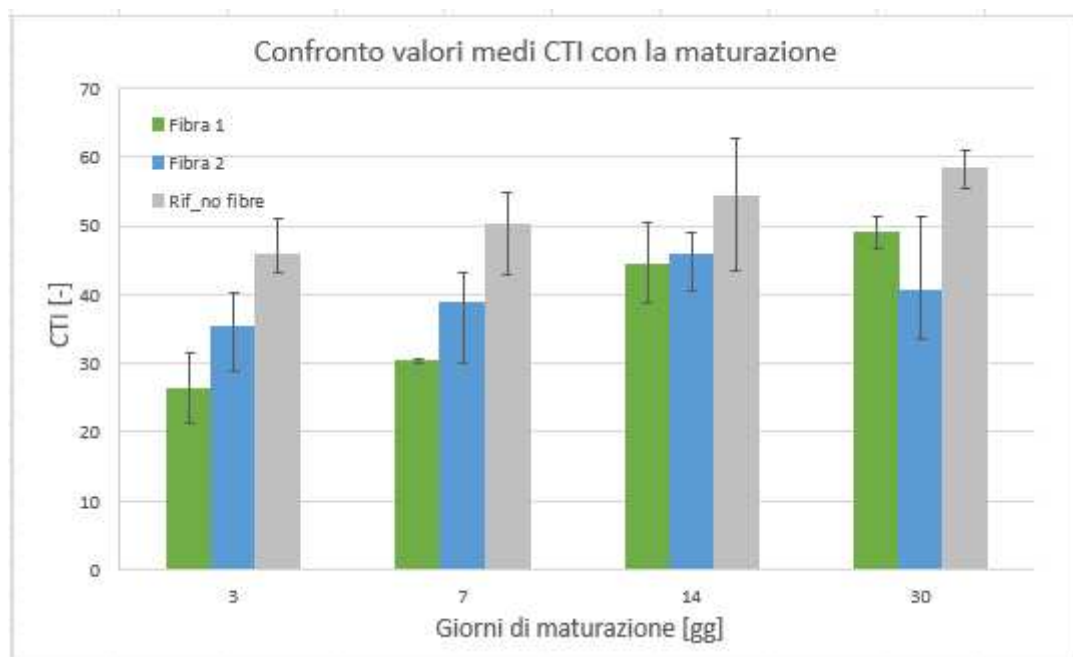


Figura 106 "Confronto valori medi CTI all'avanzare della maturazione"

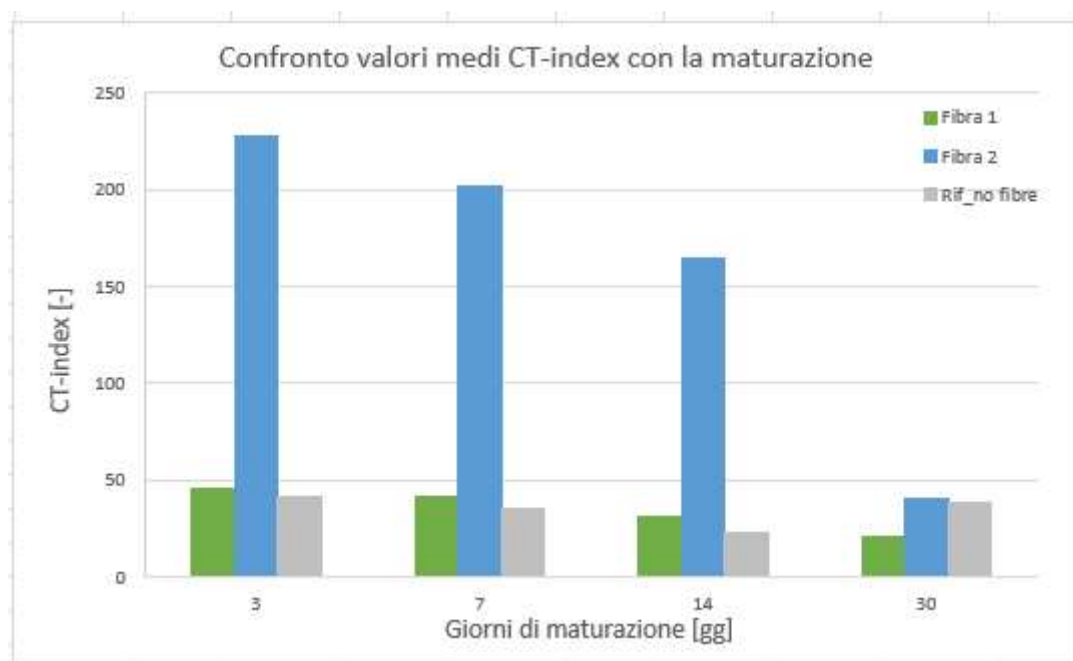


Figura 107 "Confronto valori medi CTI-index all'avanzare della maturazione"

5.7.4. MODULO COMPLESSO

Si ricorda che la prova di modulo complesso è stata effettuata solo su provini "alti", dopo carotaggio. Di seguito si confrontano i grafici ottenuti dai risultati della prova di Modulo Complesso per provini relativi allo stesso impasto.

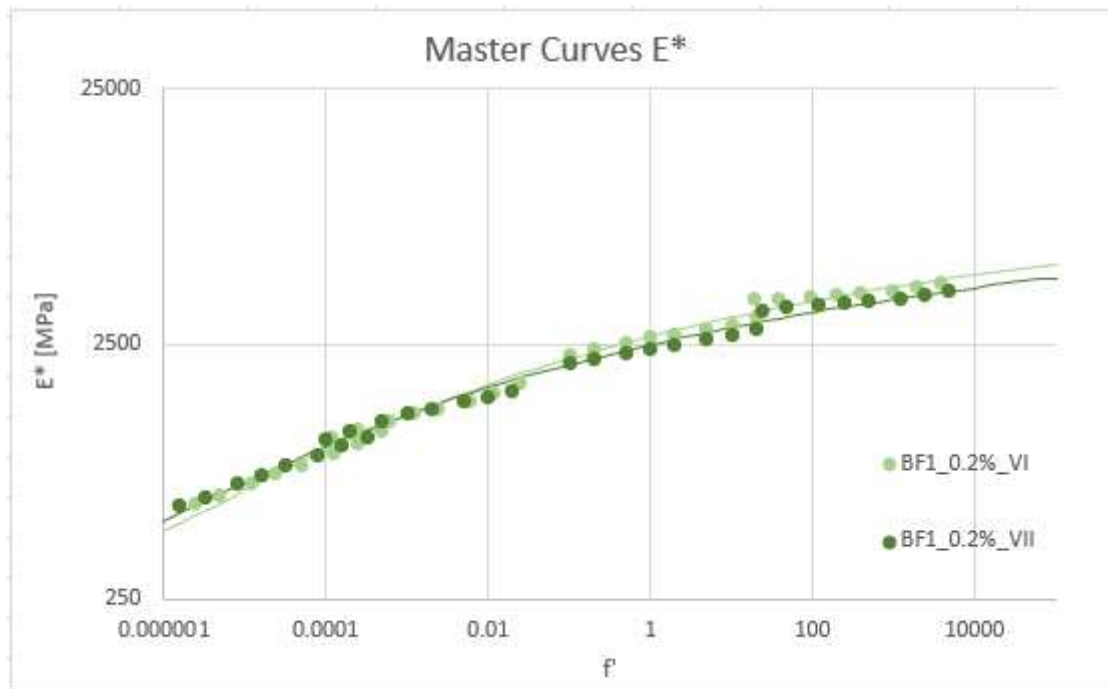


Figura 108 "Confronto Master Curves E* per provini con fibra 1"

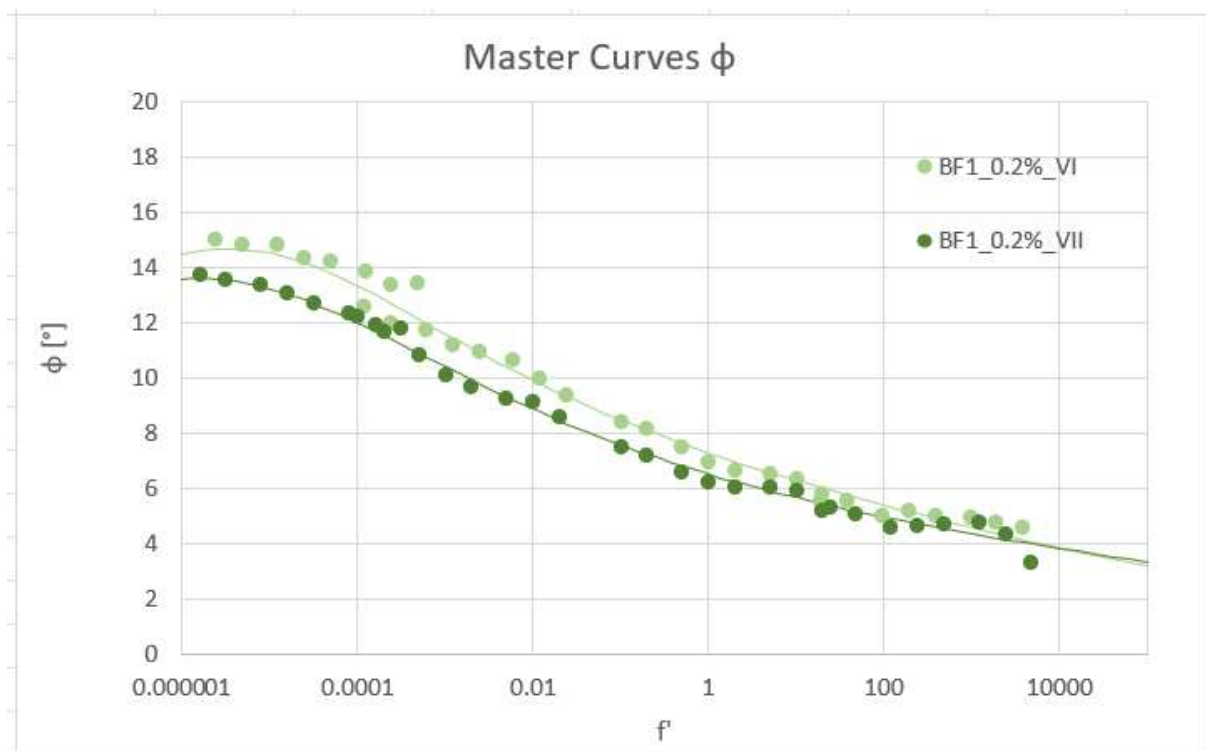


Figura 109 "Confronto Master Curves phi per provini con fibra 1"

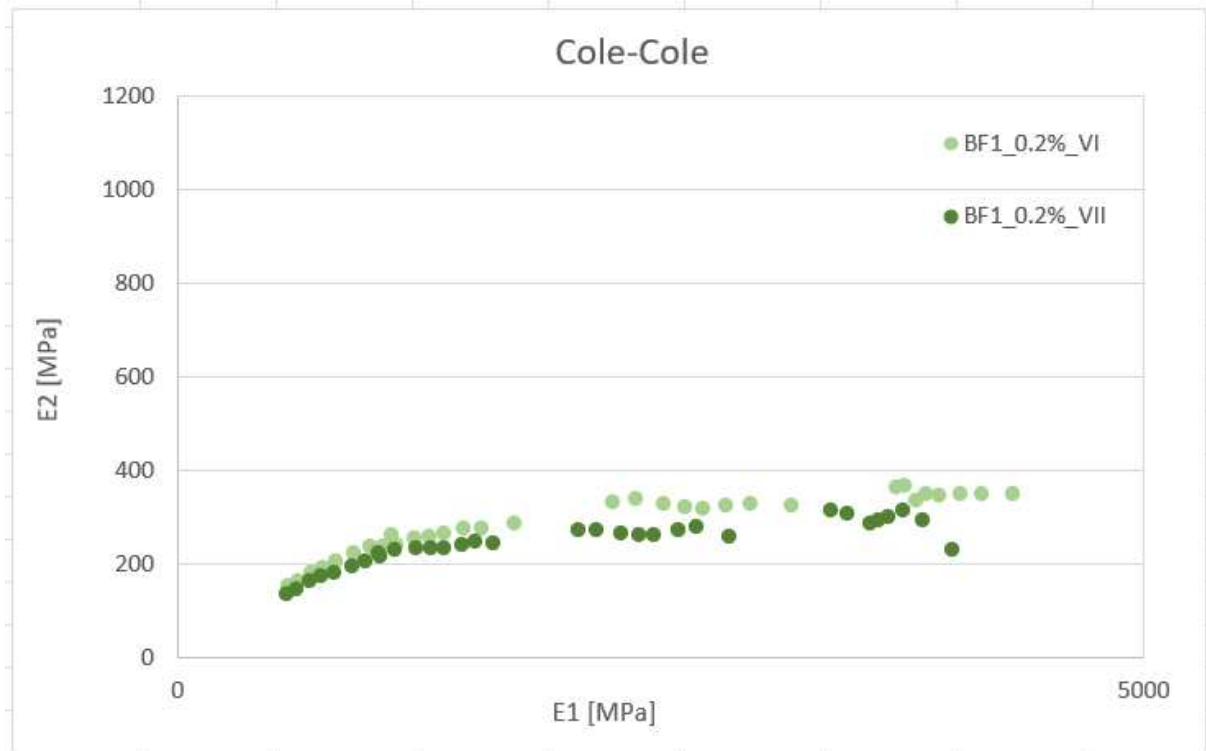


Figura 110 "Confronto grafico Cole-Cole per provini realizzati con fibra 1"

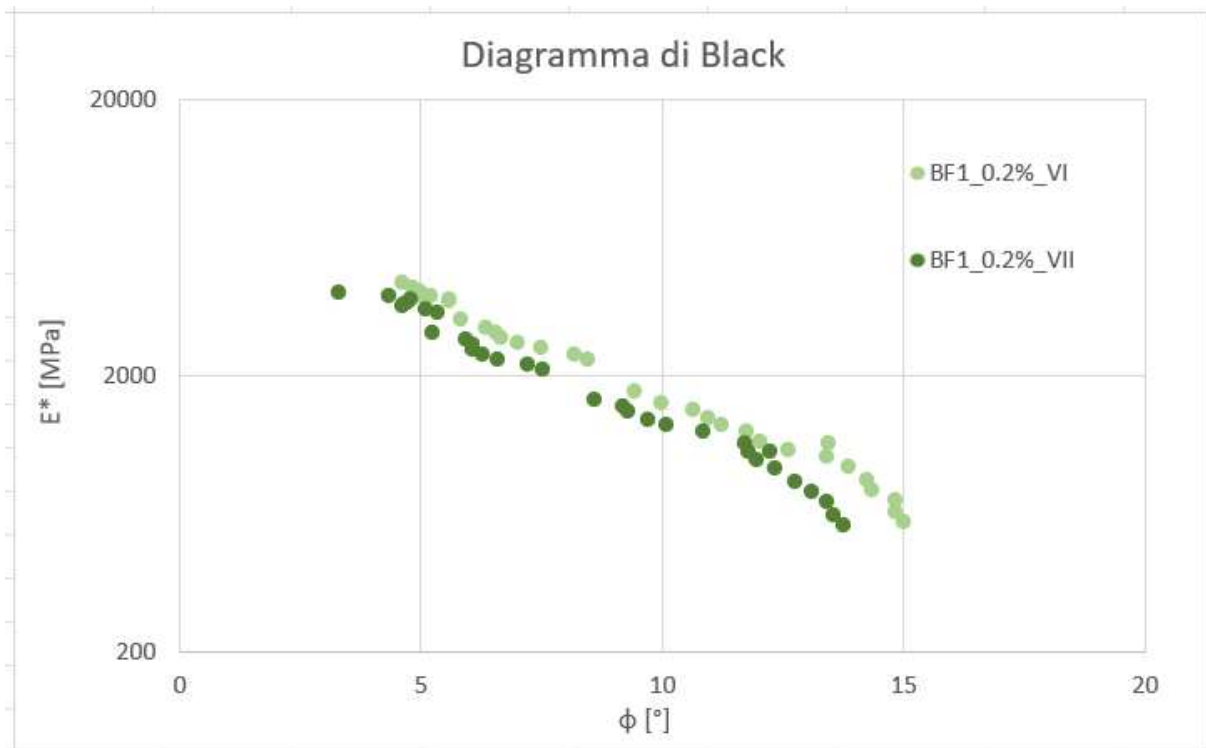


Figura 111 "Confronto diagramma di black per provini realizzati con fibra 1"

Nei grafici precedenti sono stati messi a confronto i risultati ottenuti dai due provini BF1_0.02%_VI e BF1_0.2%_VII. I provini restituiscono risultati molto simili.

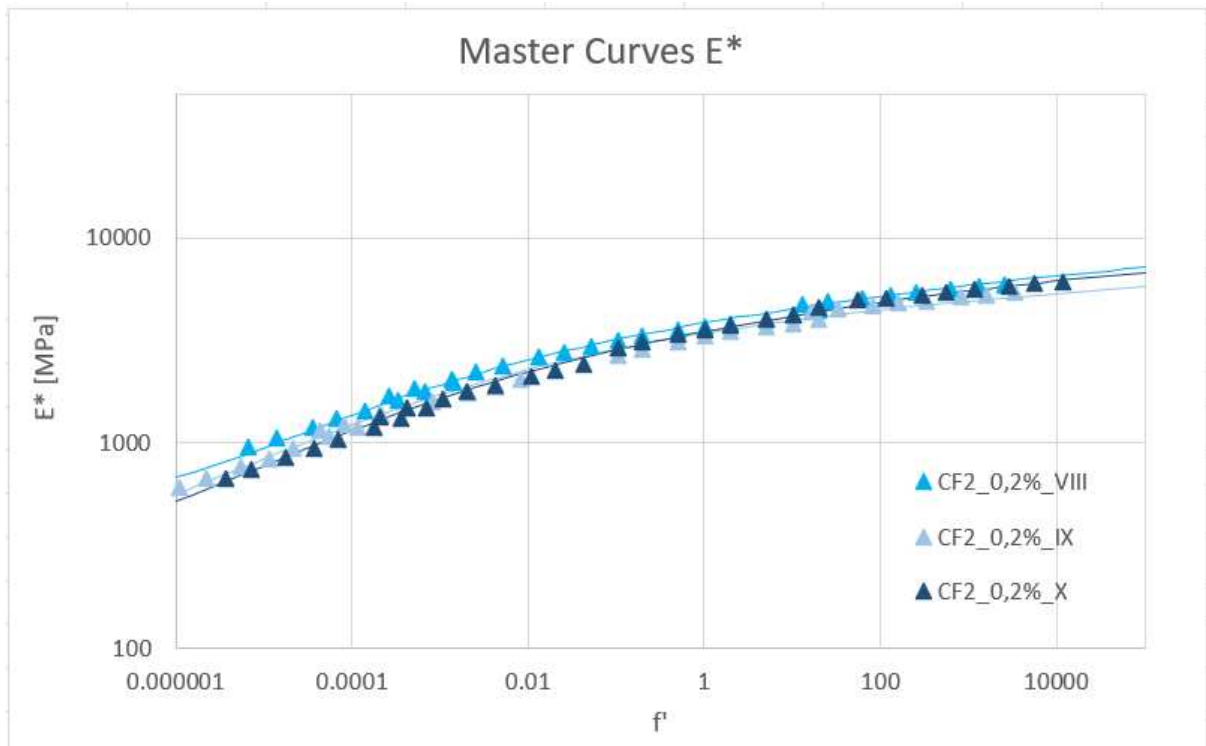


Figura 112 "Confronto Master Curves E* per provini realizzati con fibra 2"

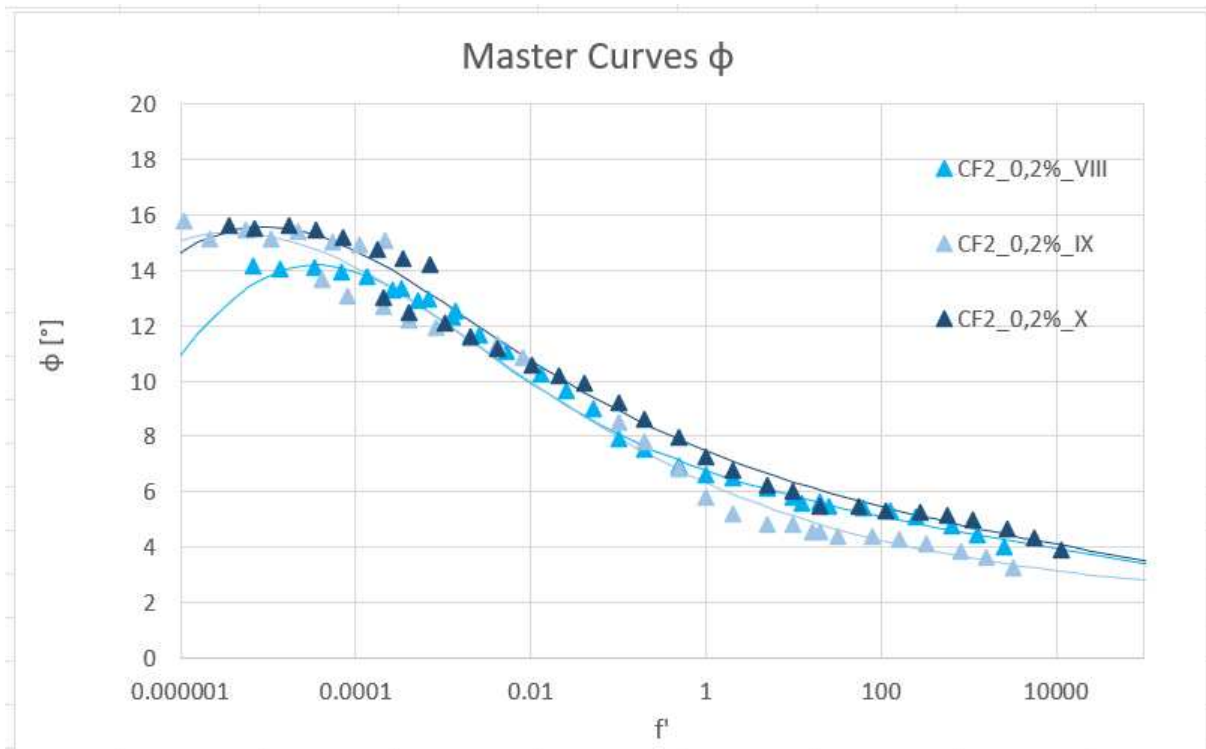


Figura 113 "Confronto Master Curves ϕ per provini realizzati con fibra 2"

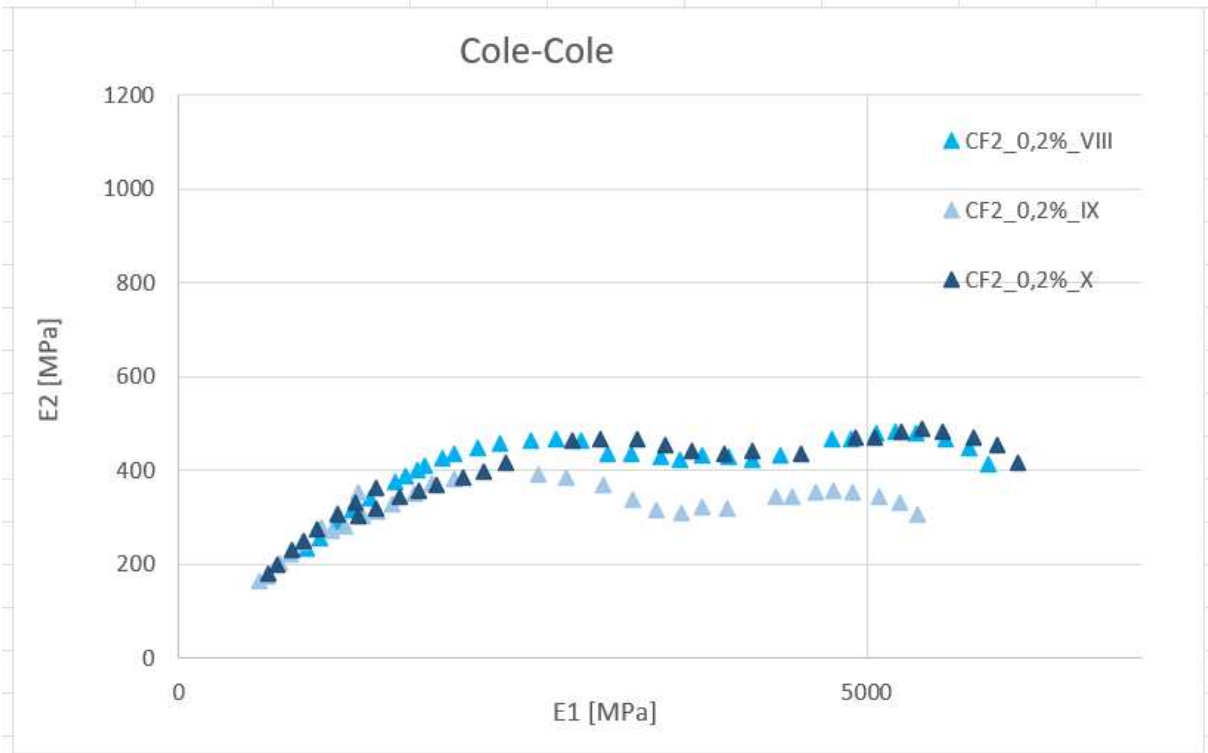


Figura 114 "Confronto grafico Cole-Cole per provini realizzati con fibra 2"

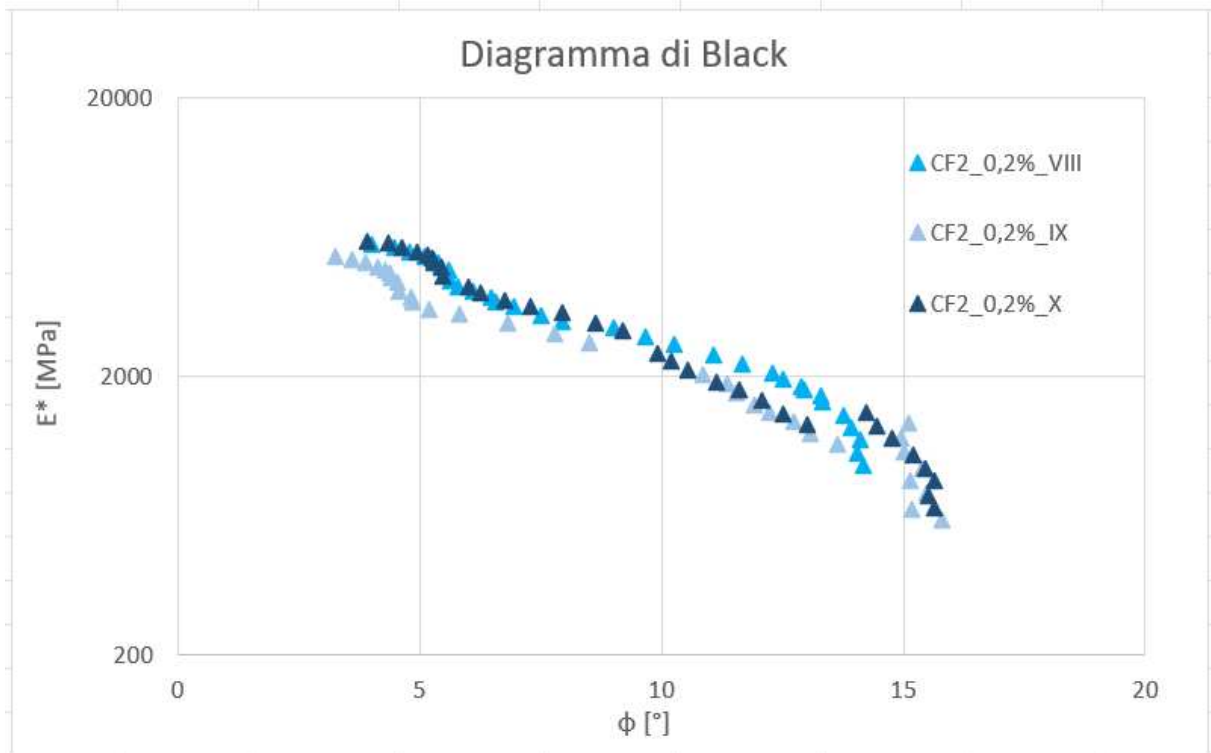


Figura 115 "Confronto diagramma di Black per provini realizzati con fibra 2"

Nei grafici precedenti sono stati messi a confronto i risultati ottenuti dai tre provini CF2_0.02%_VIII, CF2_0.2%_IX e CF2_0.2%_X. I provini restituiscono risultati molto simili tra loro.

A questo punto si mostrano i confronti tra i provini che hanno restituito i migliori risultati dalla prova di modulo complesso a compressione.

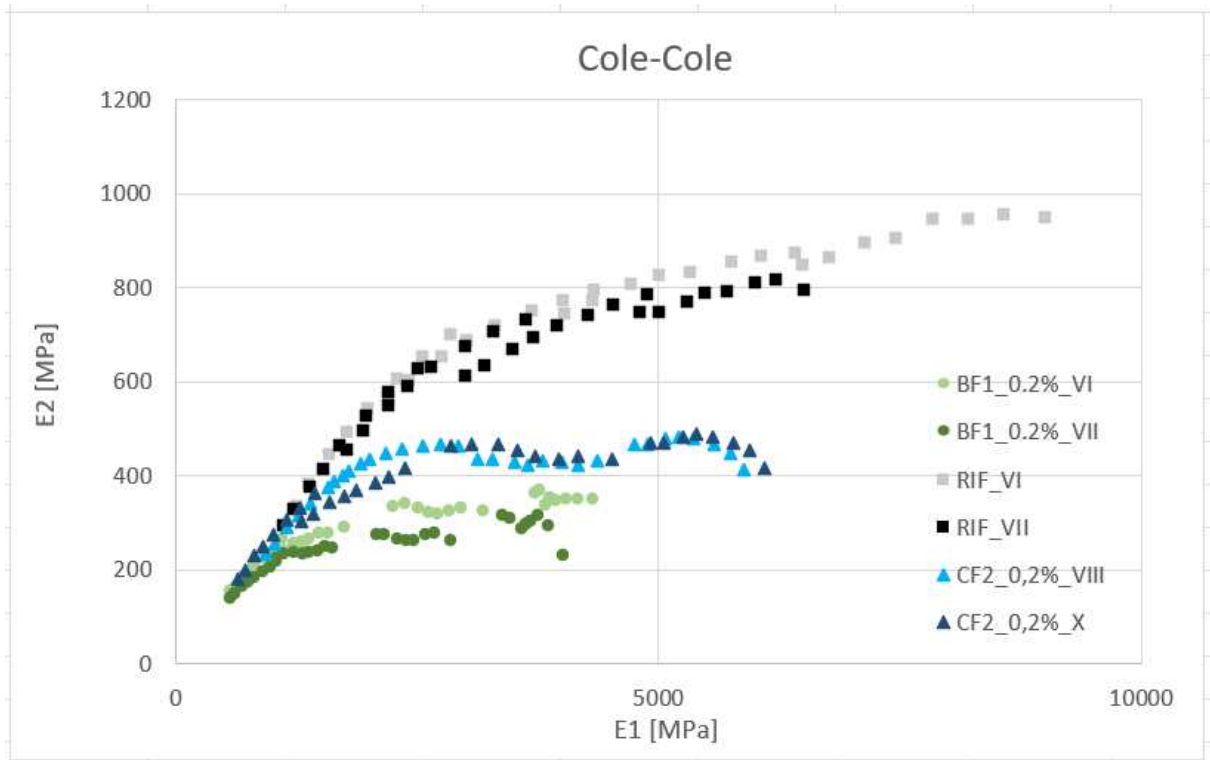


Figura 116 "Confronto del grafico Cole-Cole di alcuni dei provini testati"

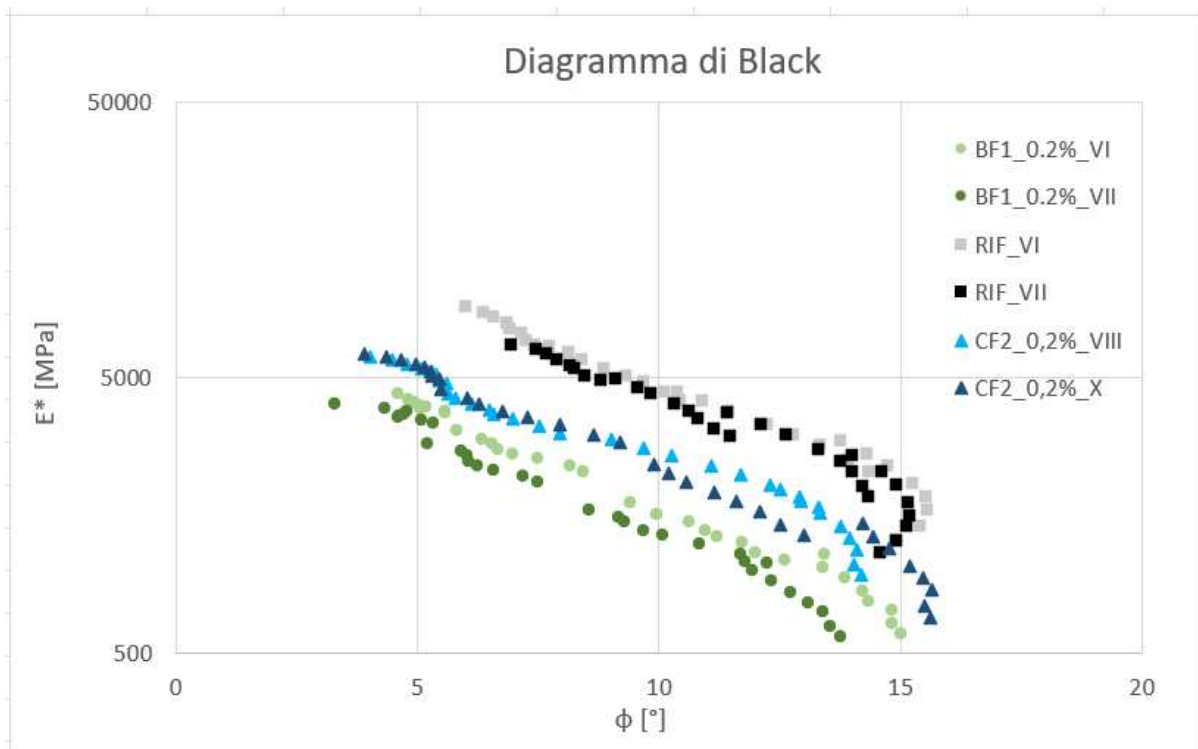


Figura 117 "Confronto del diagramma di Black di alcuni dei provini testati"

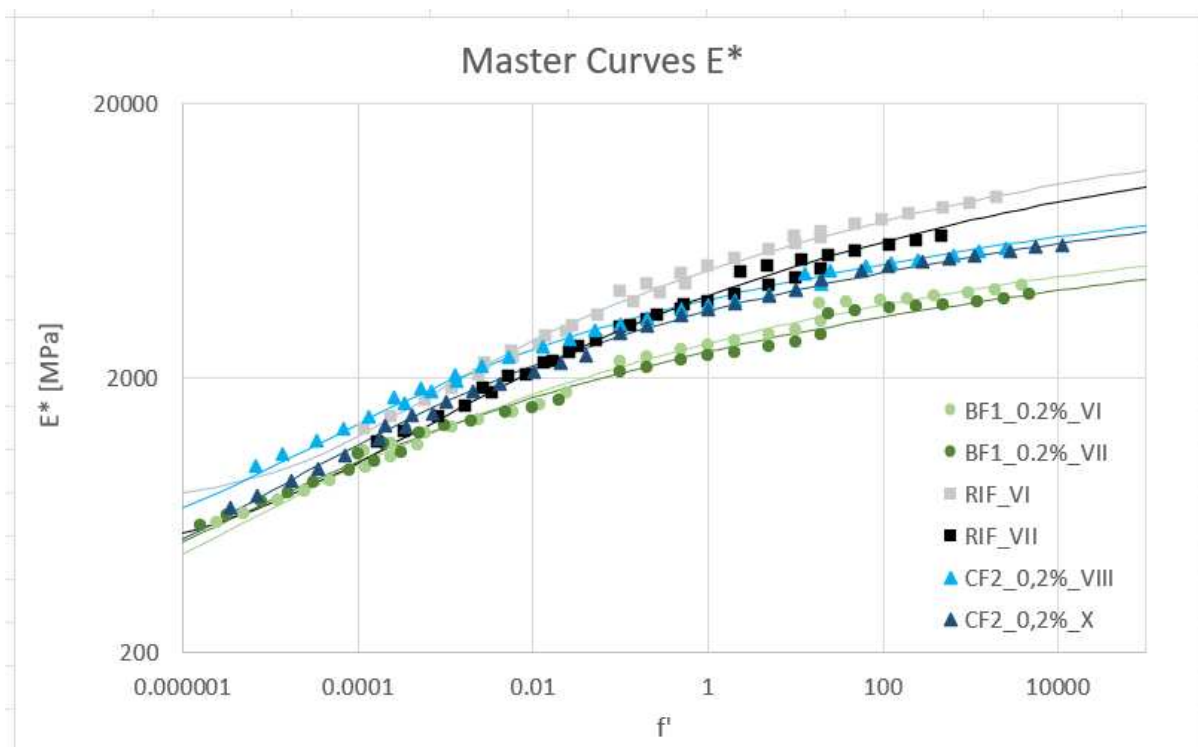


Figura 118 "Confronto Master Curves E^* di alcuni dei provini testati"

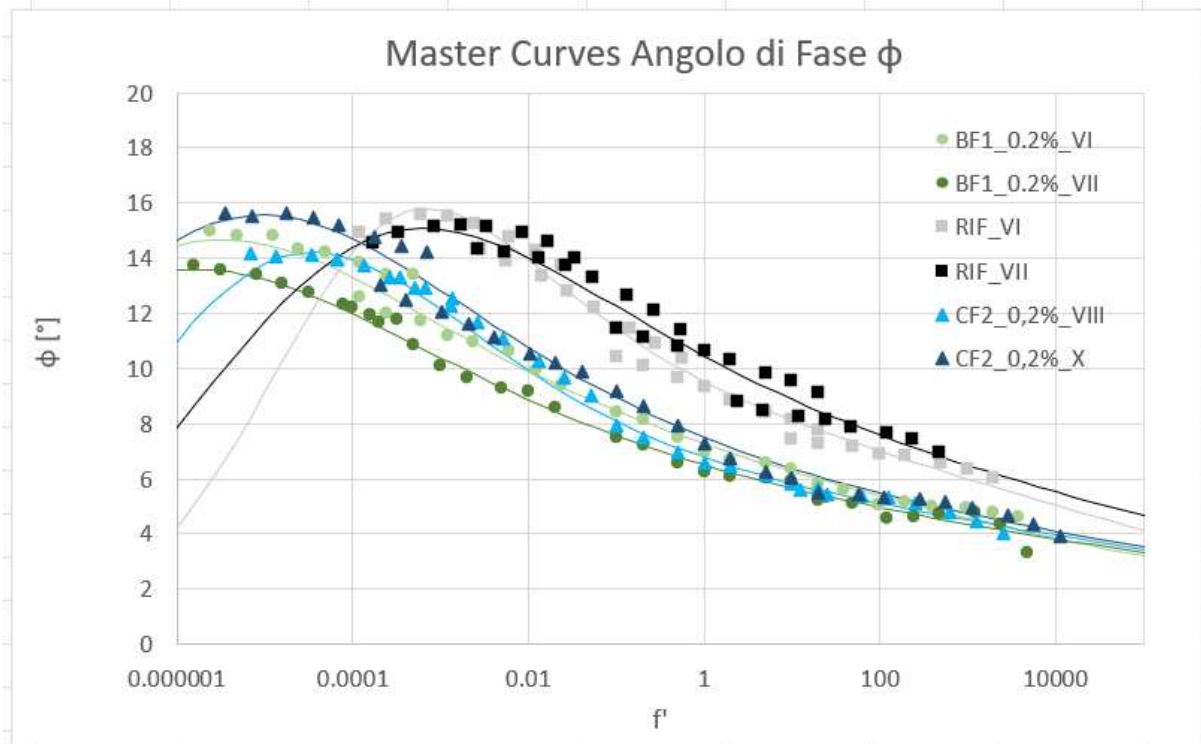


Figura 119 "Confronto Master Curves ϕ di alcuni dei provini testati"

Prima di tutto, dai grafici di figura 17 e 18 è possibile osservare come i dati sperimentali siano abbastanza allineati in una singola curva quando plottati nei diagrammi di Black e COLE-Cole, quindi è possibile convalidare il principio di sovrapposizione tempo-temperatura ed è possibile impiegare un modello matematico (2s2p1d model) per descrivere il comportamento dei materiali. Differentemente da ciò che avviene in un conglomerato tradizionale, i dati in questa tipologia di materiali non sono perfettamente allineati e talvolta dei punti sono disallineati dal trend, e questo deriva dalla complessità del materiale e delle sue componenti, tra i quali vale la pena ricordare il cemento. Tuttavia, ai fini di questa analisi si trascura questo aspetto. Dal grafico della curva maestra dell'angolo di fase è possibile osservare che le miscele con fibre hanno valori dell'angolo di fase minori per tutte le temperature rispetto alla miscela di riferimento. Si nota, inoltre, che i picchi delle curve per miscele con fibre sono spostati più a sinistra rispetto al piccolo della curva della miscela di riferimento.

5.7.5. ITFT

I confronti riportati successivamente sono relativi a provini realizzati con una stessa tipologia di fibra, ma con percentuali differenti, messi a confronto con la retta di fatica dei provini di riferimento.

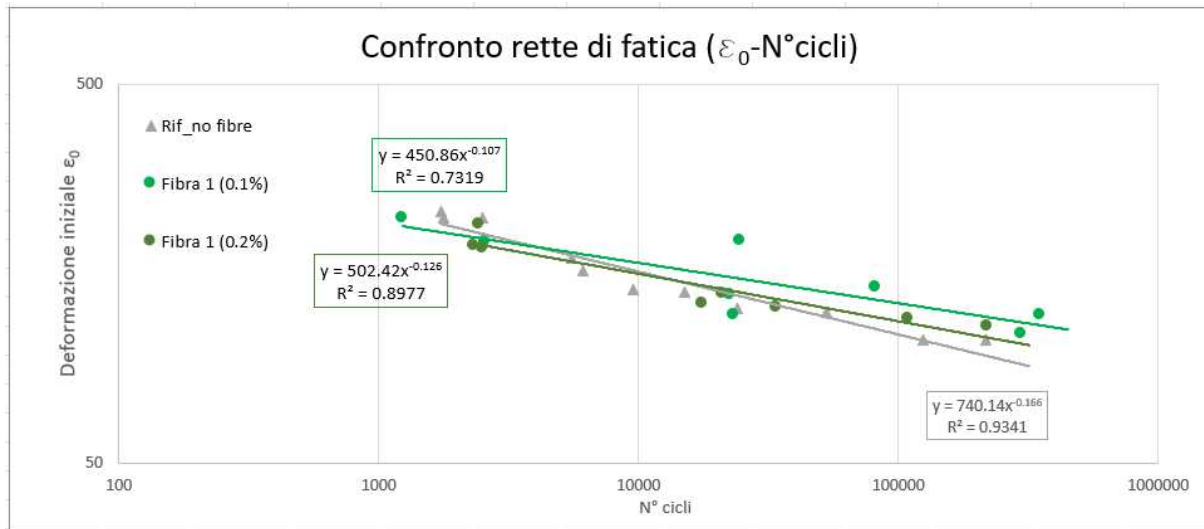


Figura 120 "Confronto rette di fatica (ϵ_0) di provini realizzati con fibra 1 e di riferimento"

Quello che si può notare è che i provini con fibra 1_0.1% hanno un comportamento a fatica migliore rispetto a quelli con fibra 1_0.2%. Questo si può affermare perché a parità di deformazione iniziale si ha un numero di cicli di rottura maggiore. Confrontando i provini privi di fibre e contenenti fibre si può constatare che quelli privi di fibre hanno un comportamento migliore per prove di breve durata (o alti livelli deformativi), mentre quelli contenenti fibre migliori risultati per prove di lunga durata. Si può confermare quindi che l'uso di fibre tessili da PFU migliora il comportamento a fatica, in particolar modo se utilizzate con una percentuale pari al 0.1%.

Di seguito si riporta il confronto tra le rette di fatica dei provini con la seconda tipologia di fibre e quelle dei provini di riferimento.

Dalla Figura 121 si può notare che per prove di lunga durata i provini con fibre hanno un comportamento migliore a fatica rispetto a quelli senza fibre. A loro volta per prove di breve durata i provini di riferimento conferiscono risultati migliori rispetto a provini con fibra2_0.1% e risultati peggiori per provini con fibra2_0.2%. Osservando le rette di fatica dei provini con fibre si nota che per alti livelli deformativi i provini di fibra2_0.2% risultano più resistenti dei provini di fibra2_0.1%, ma questo comportamento si inverte a bassissimi livelli deformativi (parte destra del grafico).

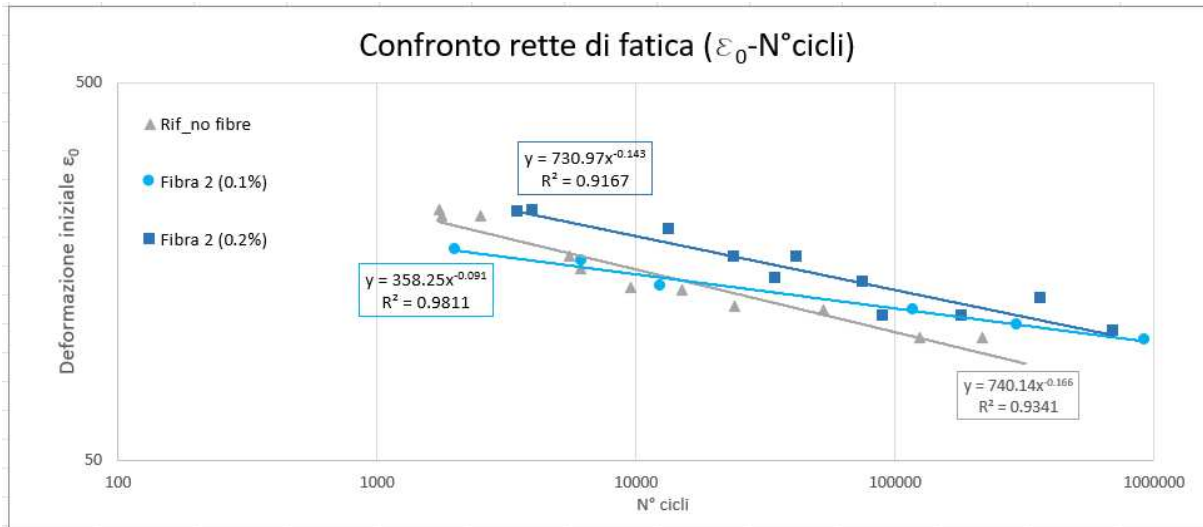


Figura 121 "Confronti rette di fatica (ϵ_0) di provini realizzati con fibra 2 e di riferimento"

Infine, si riportano i confronti delle rette di fatica per tutte le miscele studiate.

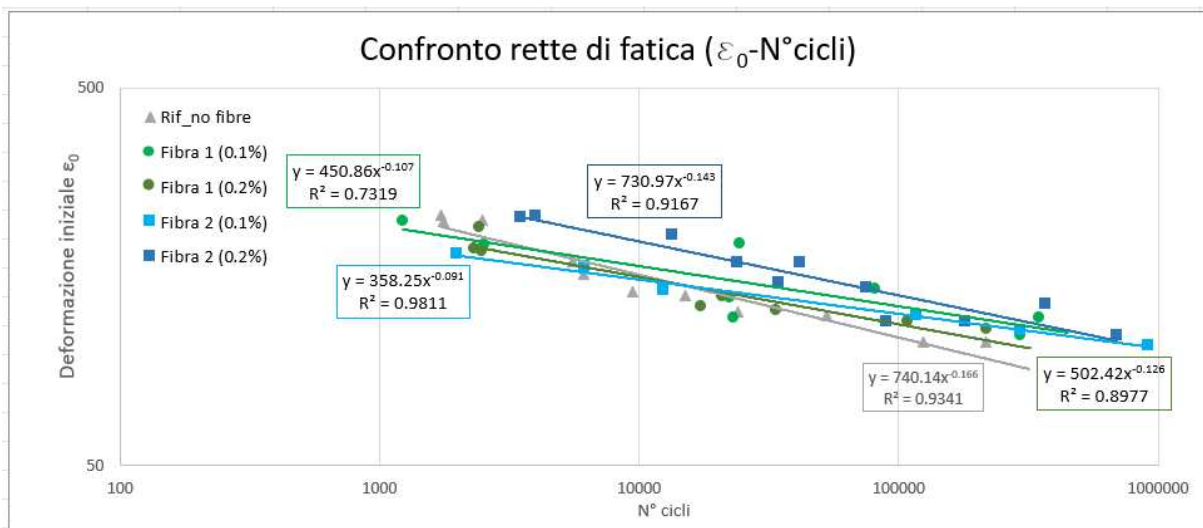


Figura 122 "Confronti rette di fatica (ϵ_0) di tutti i provini"

Si osserva che l'aggiunta delle varie tipologie di fibra nelle miscele conferiscono un migliore comportamento a fatica rispetto alla miscela di riferimento.

La miscela con fibra 2_0.2% restituisce le migliori prestazioni a fatica per alti livelli deformativi tra tutte quelle studiate, mentre per bassi livelli deformativi il comportamento migliore si ha per la miscela con fibra2_0.1%.

6. CONCLUSIONI

La presente tesi ha avuto come oggetto l'analisi prestazionale di basi a freddo fibro-rinforzate. Sono state utilizzate fibre tessili provenienti da PFU e fibre in polipropilene. L'analisi sperimentale è stata svolta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura – Sezione Infrastrutture – Area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche.

Lo studio è stato condotto su quattro tipologie di miscele:

- Miscela con 0.1% di fibre tessili provenienti da PFU;
- Miscela con 0.2% di fibre tessili provenienti da PFU;
- Miscela con 0.1% di fibre in polipropilene;
- Miscela con 0.2% di fibre in polipropilene;

Le prove di laboratorio effettuate hanno consentito di determinare:

- Le proprietà volumetriche (percentuale dei vuoti);
- La perdita di acqua;
- Il modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) dopo 3, 7, 14 e 30 giorni di maturazione a 40°C;
- La resistenza a trazione indiretta (ITS) dopo 3, 7, 14 e 30 giorni di maturazione a 40°C;
- Il modulo complesso a compressione dopo 30 giorni di maturazione a 40°C;
- La resistenza a fatica in configurazione di trazione indiretta (ITFT) dopo 30 giorni di maturazione a 40°C;

Dai risultati delle prove di laboratorio effettuate sulle varie miscele si può evincere che:

- In termini volumetrici non si osservano sostanziali differenze tra le diverse tipologie di miscela in presenza o meno di fibre e ai diversi quantitativi;
- Dai risultati di prove di trazione indiretta si è osservato che l'aggiunta di fibre comporta la riduzione di circa il 20-25% di rigidezza, ad eccezione della miscela con fibra1_0.1% in cui non si nota alcuna differenza in termini di rigidezza;
- Per la prova di trazione indiretta (ITS), l'inserimento di fibra comporta in generale una riduzione di resistenza a trazione indiretta, tuttavia, questa riduzione risulta più significativa nella fibra 1, mentre è ridotta per miscele con fibra 2;
- Il CTI conferma i risultati precedentemente commentati riguardo l'ITSM, mentre i risultati del CTI-index evidenziano come l'inserimento della fibra 2 nella miscela

incrementi notevolmente l'energia necessaria per rompere il materiale. Tuttavia, questo incremento diminuisce all'aumentare del grado di maturazione;

- Dalle prove di modulo complesso effettuate a varie frequenze e temperature di carico si è tratto che l'aggiunta di fibre nella miscela comporta una variazione del modulo di rigidezza. In particolare, inserendo la fibra di tipo 1 si ha la più bassa rigidezza a tutte le frequenze e temperature di carico. Allo stesso tempo, oltre alla più bassa rigidezza, si ha anche il più basso valore di angolo di fase e quindi le maggiori proprietà elastiche. Dalla miscela con fibra 2 si ottiene una rigidezza più bassa, rispetto alla miscela di riferimento, ad alte frequenze, ma proprietà elastiche maggiori a tutte le frequenze di carico. Ciò significa che la fibra 1 consente di diminuire la rigidezza e aumentare l'elasticità. La fibra 2, invece, fa diminuire dove necessario il modulo complesso (a basse temperature) e aumentare sempre l'elasticità del materiale;
- Dai risultati di prove a fatica, l'inserimento di fibre è positivo per il comportamento a fatica di conglomerati bituminosi riciclati a freddo. Entrambe le fibre si comportano bene, in particolar modo la fibra 2 (fibra in polipropilene) è quella che si comporta meglio, dove la percentuale allo 0.1% è quella che da migliori garanzie.

In generale l'inserimento di fibre, nonostante la diminuzione di rigidezza del materiale è positivo perché migliora le prestazioni a fatica e incrementa l'energia che si sviluppa in fase di rottura del provino (quest'ultimo aspetto visibile solo per le fibre 2). Per entrambe le tipologie di fibre si è notato che il contenuto pari al 0.1% è quello che restituisce risultati migliori.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- ANAS GRUPPO FS ITALIANE. (02/2019)- *Quaderni_tecnici_volume_5_PDF* - Tratto da www.stradeanas.it ;
- Bocci, M. (2019)- *Costruzioni di Strade A.A. 2019/2020* - Tratto da www.learn.univpm.it ;
- *DIRETTIVE_TECNICHE_2013_TESTO_UNICO_IT.* (2013) - Tratto da www.provinvia.bz.it;
- *Il progetto life del mese, REFIBRE-LIFE.* (2018) - Tratto da www.mese.gov.it ;
- *L'impiego di fibre e compound fibre/polinmeri nei conglomerati bituminosi Slittmastix Asphalt.* (2018) - Tratto da www.lavoripubblici.net ;
- Santagata, F. A. (2019) - *STRADE Teoria e Tecnica delle Costruzioni Stradali*- Pearson Italia;
- Sergio Finozzi, R. E. (2020) - *L'utilizzo dei sistemi di rinforzo per pavimentazioni bituminose* - Tratto da www.stradeeautostrade.it