
UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura (DICEA)

**IMPIEGO DELLE FIBRE DI RINFORZO
NELLE BASI A FREDDO**

**USE OF REINFORCING FIBRES IN COLD
BASES**

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Tesi di laurea di:

Emanuele Di Petta

Correlatore:

Ing. Carlo Carpani

Anno Accademico 2022-2023

Alla mia famiglia

Sommario

Introduzione.....	7
Capitolo 1- stato dell'arte	8
1.1 Le pavimentazioni stradali.....	8
1.2 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali.....	8
1.3 Riciclaggio a freddo.....	9
1.3.1 in situ	9
1.3.2 in impianto.....	10
Capitolo 2 - Materiali	11
2.1 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).....	11
2.2 filler	14
2.3 Legante bituminoso	15
2.4 Cemento.....	17
2.5 Acqua.....	18
2.6 Impiego di fibre di rinforzo nel conglomerato bituminoso riciclato a freddo	19
2.6.1 fibra tessile proveniente dal recupero di PFU (pneumatico fuori uso).....	19
2.6.2 fibre Readymesh PF.....	19
Capitolo 3- programma sperimentale e metodi di prova	21
3.1 obiettivo della sperimentazione	21
3.2 metodi di prova.....	21
3.2.1 preparazione miscela	21
3.2.2 compattazione provini con pressa a taglio giratoria	28
3.2.3 Determinazione delle proprietà volumetriche	34
3.2.3.1 Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5).....	34
3.2.3.2 Determinazione della massa volumica apparente (UNI EN 12697-6).....	35
3.2.3.3 Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)	35
3.2.4 Prova di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM).....	36
3.2.5 prova di rottura a trazione indiretta (ITS).....	44
3.3 nomenclatura provini.....	47
3.4 miscela di progetto	48
3.4.1 curva granulometrica di progetto.....	48
Capitolo 4 – Analisi dei risultati	50
4.1 Perdita di acqua	50

4.2 Proprietà volumetriche	51
4.3 - Prove di modulo di rigidità a trazione indiretta.....	53
4.4 - Prove di rottura a trazione indiretta.....	58
4.5 Calcolo CTI e CT-index.....	63
Capitolo 5 – Conclusioni	67
Bibliografia.....	69
Ringraziamenti	70

Introduzione

Negli ultimi decenni, l'industria delle costruzioni ha mostrato un crescente interesse per l'adozione di pratiche sostenibili al fine di mitigare gli impatti ambientali e promuovere l'efficienza delle risorse. In questo contesto, il riutilizzo di materiali da costruzione esistenti, come il conglomerato bituminoso riciclato a freddo, ha acquisito notevole rilevanza. Questo, infatti, rappresenta una risorsa preziosa in grado di ridurre la dipendenza da materiali vergini e di contribuire alla gestione responsabile delle risorse naturali. Tuttavia, l'adozione su larga scala del riciclato non è priva di sfide, poiché la qualità e le prestazioni del materiale possono variare significativamente. In particolare, le basi riciclate a freddo costituiscono una componente cruciale delle strade e delle infrastrutture stradali che spesso richiede miglioramenti per garantire una durata e una resistenza a lungo termine. In questo contesto, l'introduzione di fibre di rinforzo è fondamentale per garantire buoni standard di qualità e resistenza della miscela. Questo studio si propone quindi di esplorare a fondo il potenziale dell'utilizzo di fibre di rinforzo nelle basi riciclate a freddo, cercando di valutare gli effetti sulle prestazioni meccaniche e la durabilità di tali materiali. Attraverso un'analisi approfondita delle tecniche di produzione, delle caratteristiche delle fibre di rinforzo e dei metodi di valutazione delle prestazioni, svolta all'interno del Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura – Sezione Infrastrutture – Area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche, sono stati studiati due impasti con stesse caratteristiche, ma con due differenti fibre dosate in stessa quantità, la cui caratterizzazione fisica e meccanica è stata determinata mediante le seguenti prove:

- ❖ valutazione delle proprietà volumetriche;
- ❖ prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- ❖ prove di rottura a trazione indiretta (ITS).

La seguente tesi si articola in cinque capitoli:

- 1) Stato dell'arte: viene introdotto lo studio del riciclaggio a freddo del conglomerato bituminoso, facendo attenzione alle varie metodologie di trattamento;
- 2) Materiali utilizzati nella sperimentazione: vengono descritti i materiali utilizzati nel confezionamento della miscela studiata;

- 3) Programma sperimentale e metodi di prova: vengono definiti gli obiettivi della sperimentazione, le procedure di laboratorio, le tecniche di confezionamento dei provini e le miscele di progetto;
- 4) Analisi dei risultati: vengono esposti mediante tabelle e grafici i risultati ottenuti dai campioni esaminati;
- 5) Conclusioni.

Capitolo 1- stato dell'arte

1.1 Le pavimentazioni stradali

Si definisce pavimentazione stradale, la porzione di strada composta da diversi strati sovrapposti, di materiali e spessori variabili, responsabile di soddisfare requisiti strutturali e funzionali. Deve infatti, resistere al carico del traffico e trasmetterlo al terreno sottostante, garantendo al contempo sicurezza e comfort agli utenti. Le pavimentazioni possono essere classificate principalmente come rigide, semi-rigide o flessibili, ed in tale sperimentazione ci si soffermerà sulle semi-rigide, composte da uno strato di base, uno di legante (binder) e uno di superficie, oltre che una sottobase in misto cementato. L'utilizzo di elevati quantitativi di materiale riciclato è principalmente applicato agli strati di base e binder, poiché lo strato superficiale richiede prestazioni più elevate e quindi l'impiego di eccessivi quantitativi di fresato comporterebbe una perdita delle principali funzioni di tale strato.

1.2 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Secondo la direttiva tecnica UNI EN 13108-8, il concetto di "asfalto fresato" fa riferimento comunemente al "conglomerato bituminoso ottenuto attraverso la rimozione tramite fresatura degli strati superficiali della pavimentazione stradale ammalorata (arrivata a fine vita utile), il quale può essere impiegato come componente per miscele bituminose prodotte in impianti a caldo". Il riciclaggio del fresato d'asfalto o RAP (Recycled Asphalt Pavement) è una pratica sostenibile utilizzata nell'ambito dell'ingegneria stradale per riutilizzare il materiale proveniente dalla rimozione dello strato superficiale d'asfalto, trasformando questo in una risorsa e non più un rifiuto. Dopo che il fresato d'asfalto viene rimosso mediante una fresatrice, il materiale risultante viene raccolto e sottoposto a un processo di lavorazione. In genere, questo implica la selezione, la pulizia e la classificazione del materiale fresato, al fine di rimuovere eventuali contaminanti e separare le diverse frazioni in base alle loro caratteristiche granulometriche.



Fig. 1.1 - Fresatrice

Il riciclaggio è una pratica molto diffusa e che offre diversi vantaggi. Consente infatti, di ridurre la dipendenza da materiali vergini, promuovendo così la conservazione delle risorse naturali, contribuendo alla riduzione dei rifiuti e degli scarti prodotti durante i lavori di manutenzione stradale e promuovendo un maggiore risparmio economico, poiché il materiale fresato può essere utilizzato come sostituto meno costoso dei materiali vergini prima citati. Tuttavia, è importante sottolineare che il riciclaggio del fresato d'asfalto richiede una corretta pianificazione e valutazione. È fondamentale garantire la qualità e la conformità del materiale riciclato, così come la sua idoneità all'uso previsto. Le proprietà e le caratteristiche del fresato d'asfalto riciclato devono essere adeguatamente testate e monitorate per garantire la sicurezza e le prestazioni a lungo termine delle pavimentazioni stradali. Il riciclaggio può avvenire mediante un processo a caldo o a freddo, in impianto ed in situ. La differenza principale tra i processi a caldo e a freddo risiede nelle temperature di lavorazione e nelle risorse energetiche impiegate.

1.3 Riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo, è un metodo di trattamento meno energivoro di quello a caldo, svolto a temperatura ambiente, che consentone una riduzione delle emissioni in atmosfera, una maggiore salvaguardia della salute degli operatori ed un minor impatto ambientale, offrendo vantaggi in termini di sostenibilità, riduzione dei rifiuti e risparmio di risorse. Il riciclaggio a freddo del conglomerato bituminoso può essere effettuato sia in impianto che in situ, a seconda delle esigenze del progetto e delle risorse disponibili.

1.3.1 in situ

Il riciclaggio a freddo in situ avviene direttamente sulla strada stessa. Il materiale fresato viene trattato in loco con additivi o emulsioni bituminose per ottenere la miscela richiesta. Questo approccio offre il vantaggio di ridurre i costi di trasporto e di smaltimento del materiale fresato, che viene riutilizzato

con una percentuale di circa il 100% ma richiede attrezzature e macchinari specifici per l'esecuzione del processo come i treni di riciclaggio.



Fig. 1.2 – Treno di riciclaggio

1.3.2 in impianto

Il riciclaggio a freddo in impianto prevede il trasporto del materiale fresato ad una struttura appositamente attrezzata, dove viene frantumato, vagliato e trattato con additivi, per poi essere miscelato con il legante, composto da bitume schiumato o emulsione bituminosa. Questa miscela può essere successivamente trasportata sul sito di posa e utilizzata per la creazione di nuovi strati di pavimentazione.



Fig. 1.2 impianto mobile per il riciclaggio a freddo



Fig. 1.3 impianto fisso per il riciclaggio a freddo

Capitolo 2 - Materiali

Le miscele riciclate a freddo si compongono principalmente di:

- conglomerato bituminoso di recupero (RAP);
- filler;
- legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato);
- cemento;
- acqua.

2.1 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

È un materiale derivante dalla fresatura degli strati compatti delle pavimentazioni realizzate in conglomerato bituminoso. Tale composto è costituito principalmente da frammenti di rocce aggregate e bitume che ha subito un processo di invecchiamento a causa della lunga esposizione al traffico e agli agenti atmosferici. Nella sperimentazione, sono stati campionati tre tipi diversi di materiale fresato provenienti dal medesimo impianto "In.Co.Bit. Sud S.r.l." situato in Ancona. L'azienda seguendo la procedura descritta in normativa UNI EN 933-1, ha suddiviso il materiale fresato mediante setacciatura, in tre categorie principali: fresato fine, fresato grosso e fresato 16/20. Dalla cui analisi granulometrica sono state ottenute le seguenti caratteristiche:

apertura setacci	% passante
31,5	0,0
20	0,0
16	0,0
10	0,0
8	0,0
4	0,0
2	0,0
1	0,0
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0

Tabella 2.1- Analisi granulometrica RAP fino

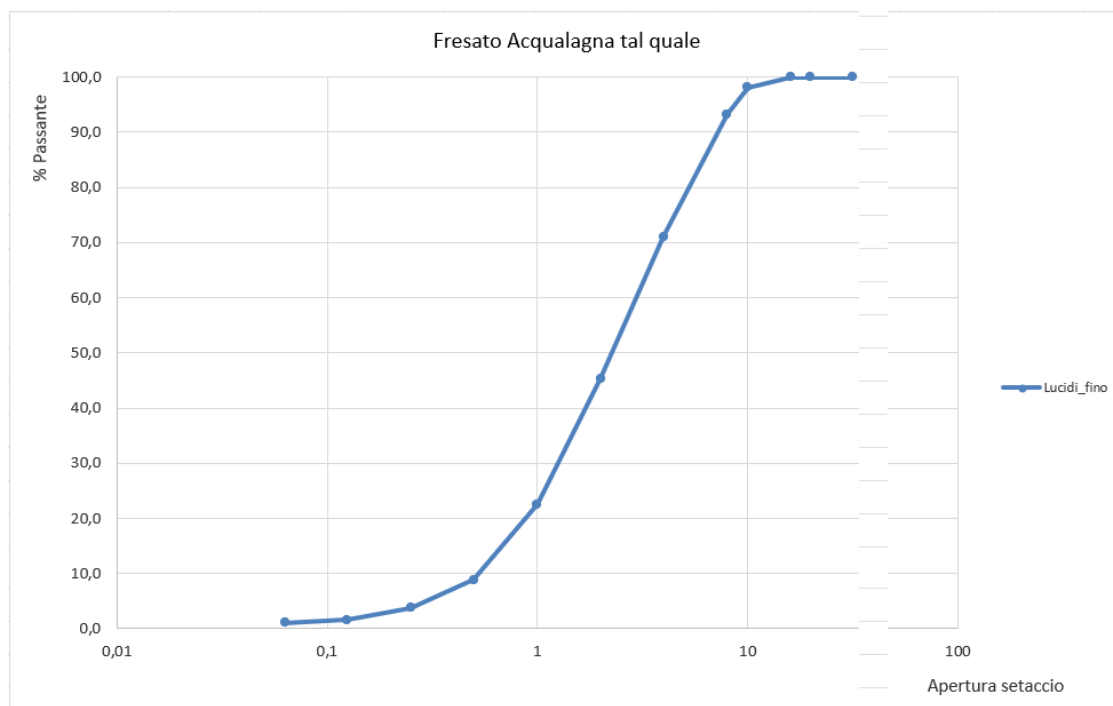


Fig. 2.1.- Curva granulometrica RAP fino

apertura setacci	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	86,5
10	62,7
8	49,7
4	22,3
2	0,0
1	0,0
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0

Tabella 2.2- Analisi granulometrica RAP grosso

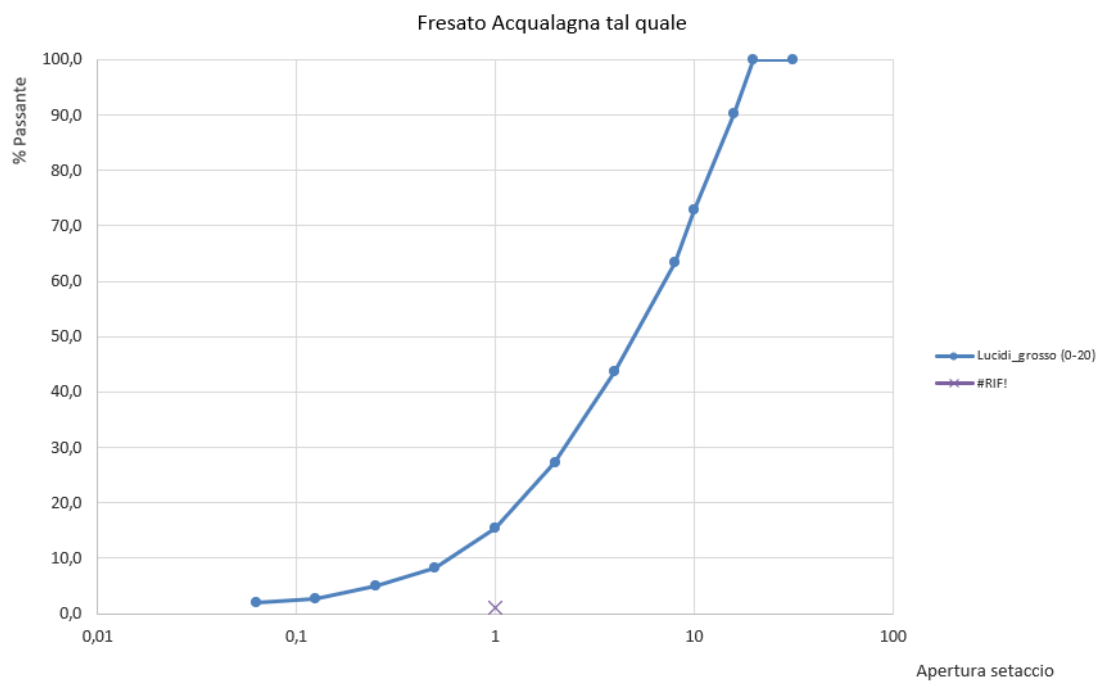


Fig. 2.2 - Curva granulometrica RAP grosso

apertura setacci	% passante
31,5	100,0
20	100,0
16	0,0
10	0,0
8	0,0
4	0,0
2	0,0
1	0,0
0,5	0,0
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0

Tabella 2.3- Analisi granulometrica RAP 16/20

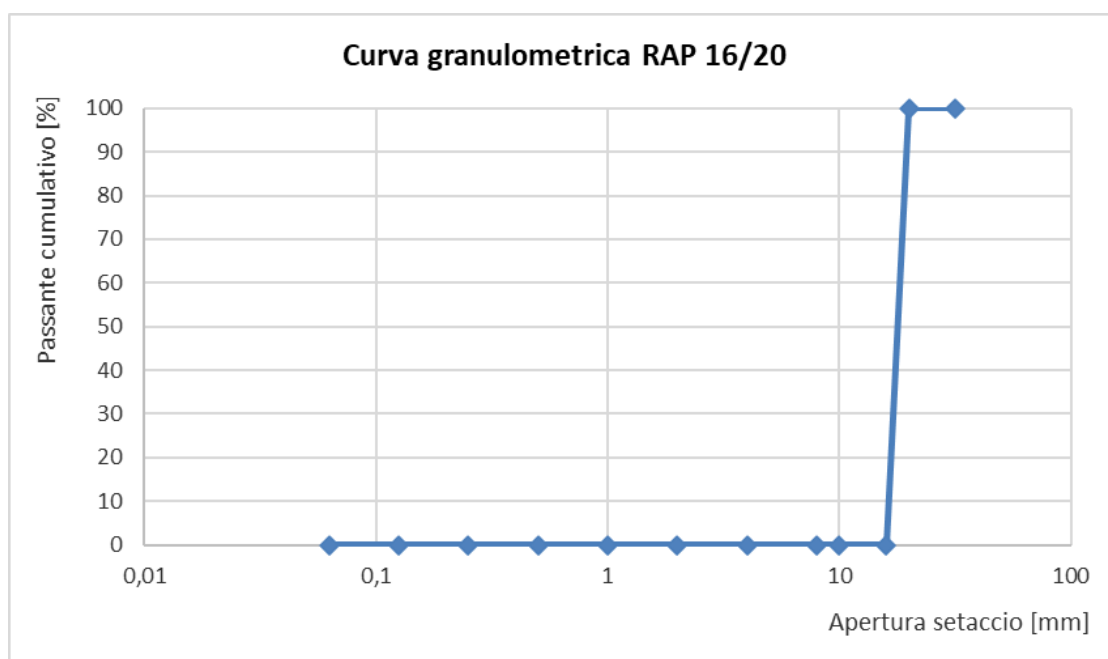


Fig 2.3 - Curva granulometrica RAP 16/20

2.2 filler

Il termine filler deriva dall'inglese "to fill" (riempire) ed infatti è la frazione passante al setaccio da 0,063 mm secondo la normativa UNI EN 933-1 mentre ha dimensione massima pari a 0,075 mm per la norma CNR BU 139. Ha la funzione di riempire gli spazi vuoti tra gli aggregati dell'asfalto, contribuendo alla realizzazione della curva granulometrica desiderata, e migliorando la

compattazione e la densità della miscela. Il filler, inoltre, migliora la lavorabilità dell'asfalto durante la posa, aumenta la stabilità e la resistenza della struttura e favorisce un'adesione migliore tra gli aggregati e il legante bituminoso. Inoltre, contribuisce a ridurre l'usura, l'abrasione e l'assorbimento d'acqua nell'asfalto.

apertura setacci	% passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	100
0,25	99,1
0,125	92,4
0,063	79,3

Tabella 2.4 – Analisi granulometrica del filler di recupero

I materiali comunemente utilizzati come filler sono: la polvere di calcare, la polvere di quarzo, la polvere di marmo o la polvere di granito. L'uso appropriato è essenziale per ottenere un conglomerato bituminoso di alta qualità e resistente nel tempo.

In questa sperimentazione è stato impiegato un filler di recupero, il quale viene ottenuto dagli impianti di produzione del conglomerato bituminoso. In pratica, dalla pulizia dei filtri dell'impianto, si può ricavare questa polvere, che può essere reimpiegata nel conglomerato al posto dei comuni filler calcarei.

2.3 Legante bituminoso

Il legante svolge un ruolo essenziale nel conglomerato bituminoso, agendo come una "colla", tenendo uniti gli aggregati e rivestendoli, garantendo l'adesione e formando uno strato impermeabile. Questo permette all'asfalto di resistere al traffico veicolare, proteggere la struttura sottostante dall'acqua e dall'usura, e conferire flessibilità alla strada. La scelta e la corretta combinazione di legante bituminoso e aggregati sono fondamentali per ottenere un conglomerato bituminoso con le proprietà meccaniche e di durabilità desiderate.

Nel campo del riciclaggio a freddo il bitume viene inserito come bitume schiumato (o espanso) o come emulsione bituminosa.

2.3.2 Emulsione bituminosa

Il bitume presente nel fresato ha attraversato processi chimici e fisici di invecchiamento, i quali hanno comportato un aumento della sua viscosità e una maggiore fragilità. Questo bitume già contenuto nell'aggregato, tuttavia, non è sufficiente per conferire le adeguate proprietà di performance alla miscela finale. Pertanto, è possibile aggiungere un'emulsione bituminosa. L'emulsione bituminosa rappresenta un composto costituito da due liquidi: uno che funge da agente dispersivo, l'acqua, e l'altro che viene disperso in forma di piccole goccioline, ovvero il bitume (Ravaoli, 2004, [5]).

A temperatura ambiente, il bitume "puro" si presenta estremamente viscoso e, di conseguenza, la facilità di lavorazione è limitata. Per superare questa problematica, è possibile riscaldare il bitume, ma questo comporta costi sia dal punto di vista economico che ambientale. Un'alternativa è l'utilizzo dell'emulsione bituminosa, che riesce a conferire una lavorabilità adeguata durante la fase di miscelazione, persino a temperatura ambiente. Nel primo caso, è il calore ad aumentare la lavorabilità del materiale, mentre nel secondo caso è l'acqua. L'emulsione bituminosa è infatti composta da acqua (40%), bitume (60%) e agenti emulsionanti, ovvero additivi utili ad evitare la separazione tra le due fasi, cioè tra acqua e bitume. Gli agenti emulsionanti, noti anche come tensioattivi, favoriscono quindi la dispersione del bitume nell'acqua, garantendo la stabilità dell'emulsione. Terminata la miscelazione, l'acqua viene eliminata e le goccioline di bitume cadono sugli aggregati, rivestendoli mediante un processo detto di "rottura". In questa fase aumenta la viscosità dell'emulsione complicando la lavorabilità del conglomerato. Infatti, per questo motivo l'emulsione deve essere adeguata ai materiali utilizzati e la rottura deve avvenire dopo o durante la fase di compattazione, così da non inficiare la lavorabilità del materiale.

La rottura dell'emulsione bituminosa avviene in tre fasi:

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

Anche la velocità di rottura è importante, e dipende da:

- Temperatura ambientale;
- Temperatura dell'emulsione;
- Dimensione delle particelle di bitume disperse;

- Dimensione e natura degli inerti;
- Modalità di miscelazione e compattazione.

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

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

Dopo la rottura avviene la fase di “presa” in cui, il bitume dopo aver perso l’acqua aderisce completamente agli inerti.

Sito produttivo	Stabilimento di Bologna Stabilimento di Perugia	Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna Via della Valtiera, 101 – 06135 Collestrada
Designazione	C60B10	
Descrizione del prodotto	Emulsione di bitume distillato per conglomerati bituminosi riciclati a freddo.	

Caratteristiche dell'emulsione	Metodo	U.d.M.	Prestazione		Classe
			min	max	
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		100	3
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	43		6

Fig. 2.4 - scheda tecnica dell'emulsione impiegata

2.4 Cemento

Nelle miscele riciclate a freddo la tipologia di cemento più utilizzata è il cemento Portland, con classe di resistenza 32.5R. questo deriva dalla macinazione del clinker, ovvero un prodotto dato dalla cottura di materie prime, come calcari, argille, ceneri e sabbie in forni rotanti ad elevate temperature (1450°C) a cui può solitamente essere aggiunta una quantità di gesso di circa il 2% per ottimizzare la qualità del cemento.

Il cemento è caratterizzato da tre fasi fondamentali:

- Idratazione: Fase caratterizzata da una serie di reazioni chimiche che si verificano tra il cemento, il gesso e l'acqua. Inizia immediatamente dopo il mescolamento e dura circa dieci

minuti. Durante questo intervallo, il materiale può essere mescolato, modellato e trasportato poiché mantiene una consistenza adattabile.

- Presa: Durante questa fase, a causa delle reazioni chimiche in corso, il materiale perde la sua plasticità e la sua lavorabilità. Questo processo si verifica entro alcune ore dal mescolamento, e al suo termine, il materiale diventa rigido e non più plasmabile.
- Indurimento: Questa fase inizia subito dopo la presa e mira a conferire al materiale una maggiore resistenza meccanica nel corso del tempo, con un aumento graduale giorno dopo giorno. Di solito, si considera questa fase completa dopo 28-32 giorni poiché il cemento ha raggiunto il 90% della sua resistenza meccanica totale.

Il cemento viene impiegato per un duplice motivo: prima di tutto permette di velocizzare il processo di evaporazione dell'acqua dentro all'impasto e quindi facilitare la sua espulsione, inoltre permette di migliorare le prestazioni del materiale, grazie alle reazioni che si generano tra il cemento e l'acqua.

2.5 Acqua

L'acqua impiegata nella produzione di conglomerato bituminoso è di fondamentale importanza, di conseguenza deve essere priva di sostanze nocive che possono influire negativamente sulle prestazioni della miscela stessa. Per i conglomerati bituminosi riciclati a freddo il quantitativo di acqua ottimale si aggira intorno al 5-7% rispetto alla massa del fresato. Durante la fase di studio della miscela si deve considerare che la presenza di acqua non è data soltanto da quella aggiunta, ma è già presente nell'impasto e deriva:

- dalla frazione acquosa dell'emulsione bituminosa;
- dall'acqua di raffreddamento delle frese nel processo di demolizione;
- dall'umidità del fresato.

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

2.6 Impiego di fibre di rinforzo nel conglomerato bituminoso riciclato a freddo

Nello studio svolto sono state utilizzate due tipologie di fibre per il miglioramento delle caratteristiche del conglomerato bituminoso riciclato a freddo:

2.6.1 fibra tessile proveniente dal recupero di PFU (pneumatico fuori uso)

L'utilizzo di tali fibre è stato introdotto in Italia con il progetto REFIBRE-LIFE, con cui si intende portare ad applicazione industriale il riuso della tela proveniente dal recupero di PFU (Pneumatico Fuori Uso). Il PFU è un rifiuto che alla luce della vigente normativa può seguire due diversi percorsi di trattamento: recupero di materiale o recupero di energia. Dal recupero di materiali da PFU si ottengono, dopo opportune lavorazioni, gomma elastomerica in granuli, acciaio armonico e fibra tessile costituita in prevalenza da nylon, rayon e simili. I granuli di gomma e l'acciaio armonico vengono reimpiegati come materia prima seconda in molteplici applicazioni. La fibra tessile invece utilizzata e recuperata per applicazioni nei conglomerati bituminosi di base (binder), infatti la tela opportunamente dosata conferisce alla pavimentazione stradale una maggiore resistenza a fatica, permettendo di allungare notevolmente la vita media della pavimentazione.

Gli obiettivi del progetto sono i seguenti:

- riduzione della quantità di rifiuto che attualmente viene avviato a discarica o a incenerimento, attraverso il reimpiego della tela proveniente dal recupero di PFU;
- produzione di materiali addizionati con tela proveniente dal recupero di PFU, aventi caratteristiche tecniche superiori a quelle attuali, per conseguire un allungamento della loro vita media;
- valorizzazione commerciale della tela recuperata, da cui deriva una maggiore convenienza economica a intraprendere il percorso del recupero di materiale, rispetto al recupero di energia; in tal modo si intende orientare verso questa pratica, ambientalmente virtuosa, il trattamento del PFU;
- replicabilità dell'attività e dei suoi risultati negli altri paesi UE [6].

2.6.2 fibre Readymesh PF

Readymesh PF è una macro-fibra strutturale poliolefinica trefolata, ad alte prestazioni, specifica per la realizzazione di superfici continue in calcestruzzo, utilizzabile anche in sostituzione della tradizionale armatura in acciaio.

La consistenza, lunghezza e finitura superficiale di Readymesh PF è stata studiata e sviluppata appositamente per applicazioni “a vista”, quali ad esempio i pavimenti industriali in calcestruzzo, prefabbricazione e rinforzo diffuso tridimensionale nei conglomerati cementizi.

L'addizione di Readymesh PF all'impasto conferisce al calcestruzzo e al manufatto risultante una maggiore resistenza agli sforzi di trazione/flessione, riduce il rischio di rotture e "spalling" del manufatto in calcestruzzo negli angoli e spigoli, riduce drasticamente il fenomeno delle fessurazioni da ritiro durante le prime ore di stagionatura del calcestruzzo.

La particolare forma e consistenza, permette a Readymesh PF di non interferire con il processo di frattazzatura meccanica tipico dei pavimenti industriali in calcestruzzo, permettendo dunque una buona finitura superficiale. Inoltre, l'utilizzo di Readymesh PF in sostituzione della tradizionale armatura d'acciaio consente un notevole risparmio di costi di materiale e tempi di posa (oltre ad essere più leggera, ecologica e sicura della rete elettrosaldata).

Tale fibra, principalmente utilizzata per il calcestruzzo, in questa sperimentazione è stata utilizzata per la produzione di conglomerato bituminoso riciclato, riportando i risultati presenti in capitolo 3.

specifiche tecniche	Readymesh PF 180	Readymesh PF 540
Lunghezza fibra	18 mm	54 mm
Diametro fibra	0,48 mm	0,48 mm
Rapporto d'aspetto	37	112
Geometria	trefolata	trefolata
Numero di filamenti	435.000 nr/kg	130.000 nr/kg
Resistenza a trazione	516 MPa	516 MPa
Materiale alcalino resistente	Si	Si
Temperatura di fusione	160-170°C	160-170°C

Fig. 2.5 - Specifiche tecniche fibra Readymesh PF



Fig. 2.6 – fibra Readymesh PF

Capitolo 3- programma sperimentale e metodi di prova

In questo capitolo si illustra l'obiettivo della sperimentazione, le apparecchiature, i protocolli di prova e le miscele di progetto.

3.1 obiettivo della sperimentazione

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi sperimentale è lo studio eseguito mediante prove di laboratorio su due miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo, preparate con differenti tipologie di fibre sintetiche in stessa quantità (0,2%) per una successiva comparazione con il riferimento, ovvero risultati dei medesimi metodi di prova ma su una miscela priva di fibre presa da sperimentazioni precedentemente sviluppate.

3.2 metodi di prova

Nella seguente sezione si presentano le metodologie di prova e le strumentazioni utilizzate durante l'attività sperimentale.

3.2.1 preparazione miscela

Una volta giunti in laboratorio, gli aggregati, dopo essere stati vagliati mediante un vibrovaglio per avere le granulometrie utili alla miscela, vengono posti in un forno a 50°C per essere completamente essiccati, assicurando la rimozione completa dell'acqua, per consentire agli inerti di assorbire la sola acqua prestabilita dal mix design. Questo consente di avere un maggiore controllo dell'acqua presente all'interno della miscela. Di conseguenza è fondamentale preparare in anticipo il mix design e sigillare ermeticamente i materiali il giorno prima della miscelazione per evitare la dispersione di umidità. La tabella sottostante riassume i dosaggi impiegati per ogni materiale inserito per la preparazione dell'impasto.

Materiale	Dosaggio [g]
Fresato fino	6713
Fresato grosso	6305
Fresato 16-20	1048
filler	867
Acqua di assorbimento	213.7
Cemento	299
Emulsione bituminosa	597
Acqua di aggiunta	294
Fibre	30.9
Totale	16337
Totale per ogni provino	2841

Tabella. 3.1 mix design



Fig. 3.1 - Vibrovaglio

Il materiale separato viene posizionato in cassoni in plastica rigida per poi essere pesato e miscelato ottenendo la curva granulometrica ottimale. In seguito, si aggiunge l'acqua di assorbimento prevista nel mix design (Fig. 2.3).



Fig. 3.2- separazione granulometrica

I cassoni vengono sigillati per evitare la perdita di umidità:

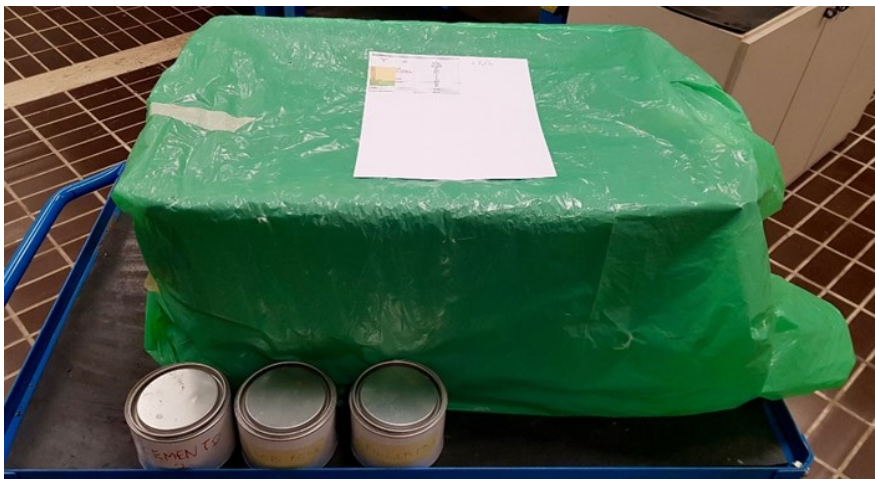


Fig. 3.3- cassone sigillato

Ad un giorno dalla preparazione del materiale utile (inerti, cemento, filler e fibre) pesato preventivamente, e dall'aggiunta di acqua, secondo i dosaggi indicati in ricetta, si procede con la miscelazione, per la quale si è utilizzato un miscelatore meccanico.



Fig. 3.4 – Miscelatore meccanico

Nella macchina la miscelazione segue le seguenti fasi:

- inserimento di aggregati e filler a temperatura ambiente con tempo di miscelazione di 60 secondi:



Fig. 3.5 – Aggregati nel miscelatore



Fig. 3.6 – Aggiunta di filler di recupero

- inserimento delle fibre e tempo di miscelazione di 60 secondi:



Fig. 3.7 – aggiunta di fibra tessile proveniente da PFU

- inserimento di metà del dosaggio di cemento e tempo di miscelazione di 60 secondi:



Fig. 3.8 – Aggiunta di metà dosaggio di cemento

- Si completa l'immissione del cemento con la seconda metà e si miscela per altri 60 secondi.
- Viene inserito metà del quantitativo di acqua di aggiunta previsto e si miscela per 60 secondi:



Fig. 3.9 – Aggiunta di metà dosaggio di acqua

- inserimento dell'emulsione bituminosa preventivamente pesata miscelazione di 60 secondi:



Fig. 3.10 – Preparazione emulsione



Fig. 3.11 – Aggiunta di emulsione

- Infine, viene inserita la metà di acqua di aggiunta rimanente e si mescola per altri 60 secondi:



Fig. 3.12 – Fine della mescolazione

Con il materiale così ottenuto si realizzano i provini mediante una pressa a taglio giratoria:

3.2.2 compattazione provini con pressa a taglio giratoria

La pressa a taglio giratoria è uno strumento impiegato per il confezionamento di provini cilindrici in conglomerato bituminoso.



Fig. 3.13 – pressa giratoria

Questo macchinario, dotato di:

- telaio di carico con supporto inclinabile per la locazione della fustella
- pistone di carico per l'applicazione del carico verticale
- base rotante per la rotazione del provino



Fig. 3.14 componenti della pressa a taglio giratoria

permette la formazione di provini mediante una compattazione inclinata, generata andando a determinare facilmente un angolo di rotazione variabile da 0° a 2° (con possibilità di incrementarlo fino a 3° mediante registrazione). La pressa infatti realizza la compattazione della miscela attraverso

l'applicazione contemporanea di una pressione assiale costante e di una rotazione. È inoltre presente un supporto inclinabile che permette l'applicazione di un angolo di inclinazione di $1,25^\circ$, per favorire l'addensamento. La pressione di compattazione può variare da 0 a 900 kPa (con un'offerta di alimentazione a 10 bar) e il numero massimo di rotazioni è 999. È possibile confezionare provini di dimensioni da 100 o 150 mm, con un'altezza utile dello stampo di 250 mm. L'interruzione della compattazione può avvenire quando si raggiungono i giri preimpostati o ad un'altezza desiderata.

La macchina è completamente in linea con le norme americane AASHTO T312-11 e ASTM D6925-09 e con la normativa europea EN 12697-31. Tutta la struttura meccanica necessaria per il movimento rotatorio e per l'applicazione della pressione verticale è posizionata sopra la superficie di appoggio del campione. Questo approccio consente la compattazione di miscele contenenti emulsioni bituminose e bitumi schiumati senza alcun rischio di danneggiare la macchina. Il liquido percolato risultante può tranquillamente fluire nella zona completamente libera situata sotto il piano di appoggio. L'intero sistema è gestito da un software che inoltre registra l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro effettuato.



Fig. 3.15 – Schermata di apertura del soft

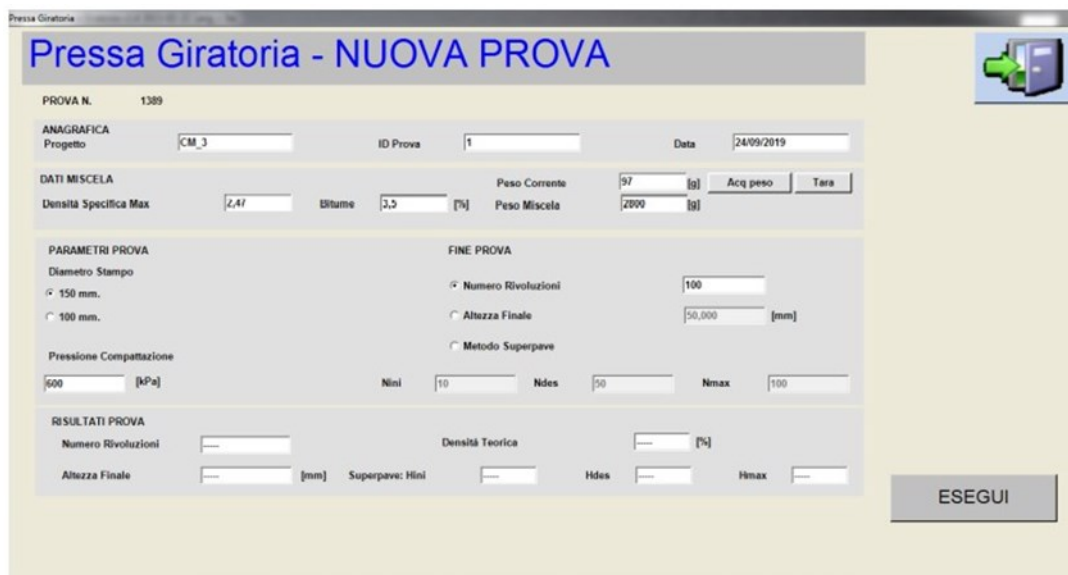


Fig. 3.16 – Setup parametri di miscelazione

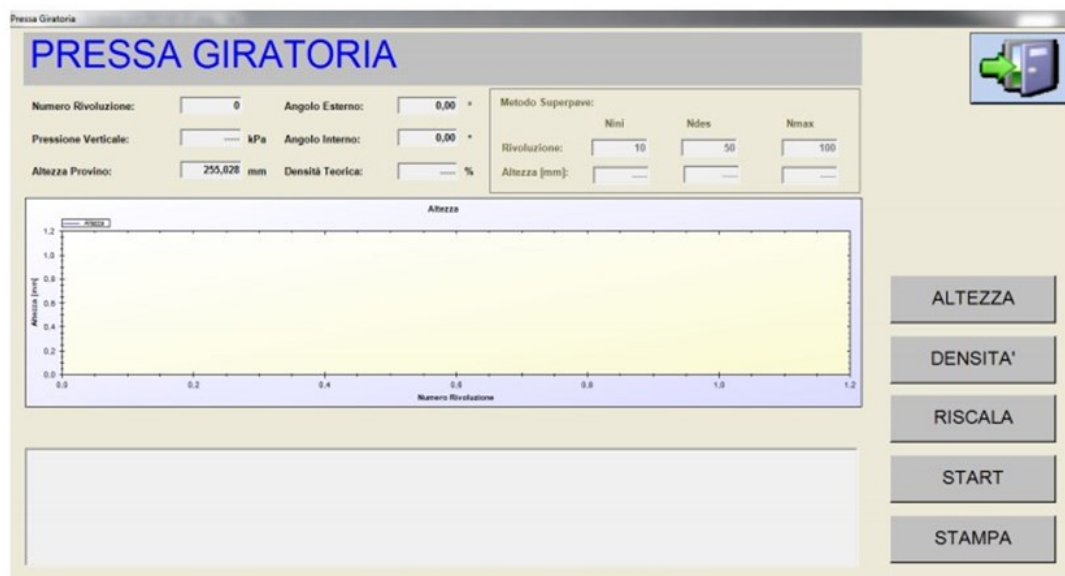


Fig. 3.17 – Finestra di avvio prova del software

Mediante il software si impostano i parametri di settaggio utili alla sperimentazione:

- Tipo di fustella: non drenata
- Angolo di rotazione: $1,25^\circ \pm 0,02$
- Velocità di rotazione: 30 giri al minuto
- Pressione verticale: 600 kPa
- Diametro provino: 150 mm
- Numero di giri: 100

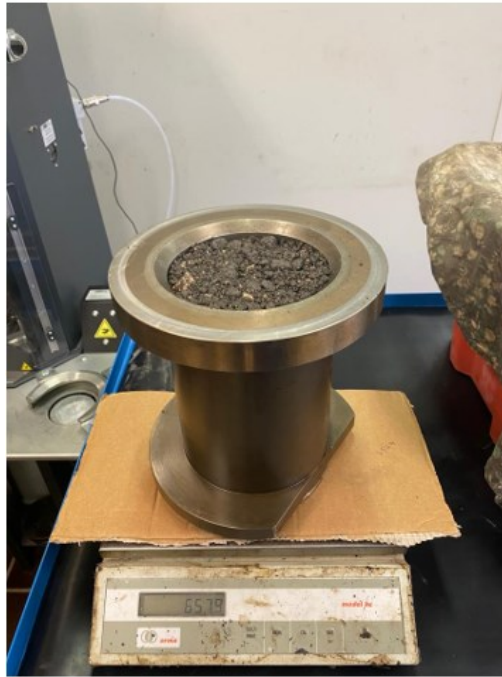


Fig. 3.18 – Fustella con diametro 150 mm

Nella fustella viene inizialmente inserito un disco di carta sul fondo per evitare l'adesione del conglomerato sulla piastra infinitamente rigida di fondo, introducendo poi il materiale, realizzando provini da 2841g. Viene poi posto superiormente un altro disco di carta in modo da evitare il contatto diretto tra materiale e piastra di compattazione. Pronta la fustella viene inserita sotto al compattatore preventivamente lubrificato.



Fig. 3.19 – Fustella nella pressa giratoria

Mediante una manovella viene poi applicato l'angolo giratorio, di $1,25^\circ$, corrispondente a 16 giri di manovella, utile a garantire una migliore compattazione e addensamento del materiale. Si avvia allora la prova. Ultimati i giri impostati per la compattazione, prima dell'estrazione si raddrizza il provino. In tal caso la procedura di raddrizzamento consiste nel sottoporre il provino a due cicli da tre rivoluzioni l'uno con graduale riduzione dell'angolo giratorio. Si procede così all'estrazione del provino incastrando la fustella in appositi supporti e azionando il martinetto idraulico che permette il sollevamento della piastra inferiore.



Fig. 3.20 – esempio di estrazione provini

Il programma memorizza costantemente l'altezza del campione durante ogni ciclo e, man mano che il test procede elabora una rappresentazione grafica della compattazione. Da questa rappresentazione si deduce il valore di C_i , che rappresenta il grado di compattazione alla i -esima rotazione, basato su V_{m_i} , il volume dei vuoti relativi al numero di cicli, attraverso la seguente formula:

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

Utilizzando i risultati acquisiti, si traccia una curva di compattazione, rappresentata come un grafico in cui i valori del grado di densificazione sono riportati sull'asse verticale su una scala aritmetica, mentre sull'asse orizzontale è rappresentato il numero di cicli su una scala logaritmica. La relazione matematica che collega i parametri di lavorabilità è la seguente:

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

Dove:

- C_1 : auto-addensamento della miscela
- k : lavorabilità (ovvero la capacità di compattazione e deformazione del conglomerato bituminoso sotto l'azione di una forza)

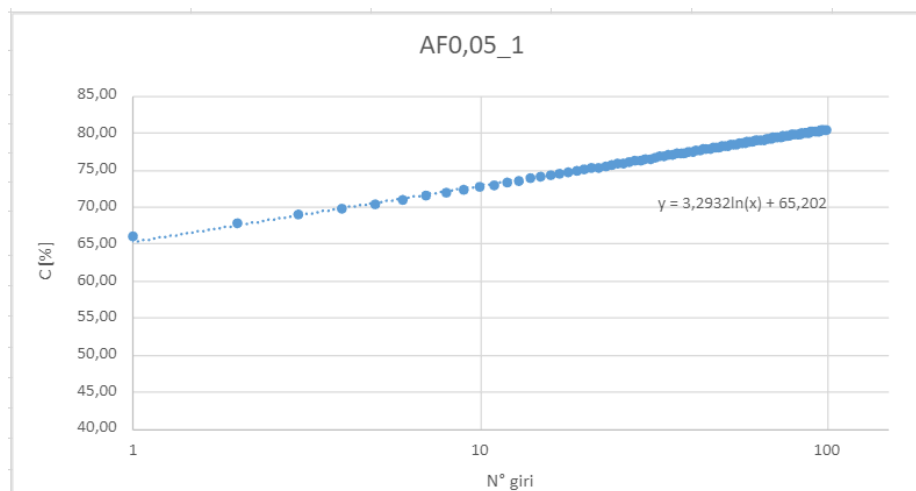


Fig. 3.21 - curva di addensamento dell'impasto relativa ai primi provini

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

provino	C_1 [mm]	k [/]
1	62,531	3,1583
2	62,456	3,34
3	62,177	3,3557
4	61,711	3,3544
5	63,007	3,3083
6	61,248	3,4465
media	62,1883	3,3272

Tabella 3.2.- Coeff. C_1 e k relativi ai provini dell'impasto con 0,05% di fibre

Inoltre, durante la compattazione, su un foglio vengono annotati dei valori di massa:

- 1) $Tara_1$: massa della fustella
- 2) $Tara_2$: massa del disco di carta
- 3) $Tara_3$: massa del vasetto

- 4) M_1 : massa della fustella, della carta e del materiale pre-compattazione
- 5) M_2 : massa della fustella, della carta e del materiale post-compattazione
- 6) M_4 : massa del provino e del vasetto

3.2.3 Determinazione delle proprietà volumetriche

Le proprietà volumetriche della miscela influenzano il comportamento meccanico e la durabilità in esercizio del conglomerato bituminoso. Il volume totale della miscela è caratterizzato da tre componenti:

- 1) inerti
- 2) legante
- 3) vuoti

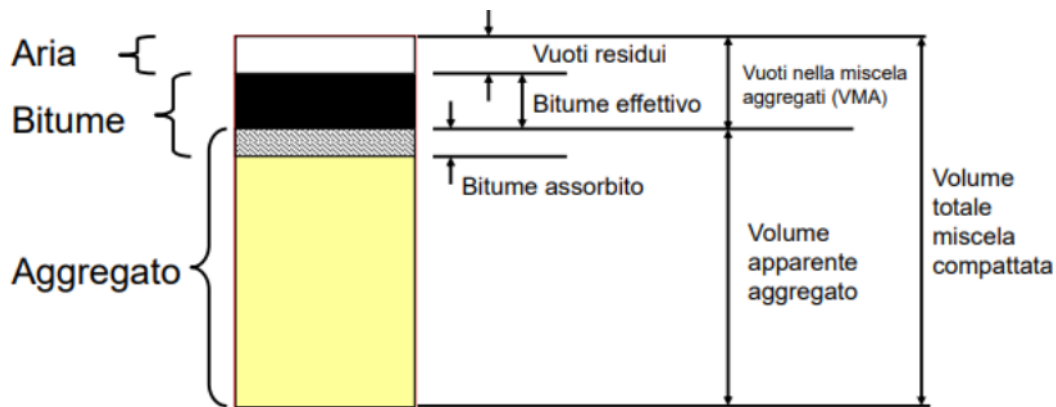


Fig. 3.22 – costituenti del conglomerato

Di seguito si elencano i metodi per il calcolo volumetrico del provino utilizzati nella presente sperimentazione, che ha rispettato la procedura seguente:

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

È definita massa volumica massima, la massa per unità di volume, esclusi vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima ρ_m è stata valutata utilizzando un procedimento matematico, conforme alla normativa UNI EN 12697-5, secondo cui:

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

Dove:

- ρ_m : massa volumica massima della miscela in kg/m^3 ;
- p_a : percentuale di aggregati nella miscela in m/m;
- ρ_a : massa volumica apparente degli aggregati in kg/m^3 ;
- p_b : percentuale di legante nella miscela in m/m;
- ρ_b : massa volumica del legante a 25 °C in kg/m^3 .

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

È definita massa volumica apparente, la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. Nella presente sperimentazione tale massa volumica apparente ρ_b è stata valutata utilizzando una procedura geometrica, secondo la normativa UNI EN 12697-6. Tale procedura prevede di misurare le dimensioni del provino e determinare la massa del campione secco (m_1). La massa volumica geometrica (ρ_{bgeom}) per provini cilindrici viene misurata mediante la seguente formula:

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

dove:

- ρ_b : massa volumica apparente del provino in kg/m^3 ;
- m_1 : massa del provino asciutto in g
- h: altezza del provino in mm;
- d: diametro del provino in mm.

In particolare, il valore di massa “m” considerato nel calcolo è stato decurtato del quantitativo di acqua presente nel provino al momento della pesata (post rottura), e questo in modo tale da escludere il contributo dell'acqua dal calcolo dei vuoti, i quali porterebbero ad una riduzione dei vuoti, che in realtà non c'è, poiché questa acqua nel tempo evapora.

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

la determinazione del volume dei vuoti dei provini ottenuti con pressa giratoria, in ottemperanza alla normativa UNI EN 12697-8 è stata svolta in funzione delle masse volumiche, apparente e massima, mediante la formula:

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

3.2.4 Prova di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)

Lo strumento impiegato è chiamato NAT (Nottingham Asphalt Tester) e, in conformità con le direttive stabilite dalla normativa UNI EN 12697-26, consente di determinare il modulo di rigidezza attraverso una prova di trazione indiretta. Con l'utilizzo di questa apparecchiatura, mediante l'applicazione di impulsi di compressione lungo il diametro verticale di un campione cilindrico, si induce una deformazione elastica in una direzione perpendicolare a quella del carico. Il NAT emula le condizioni di tensione e deformazione causate dal passaggio di pneumatici. Il risultato ottenuto da questa prova è denominato ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus), ovvero il modulo di rigidità a trazione indiretta.

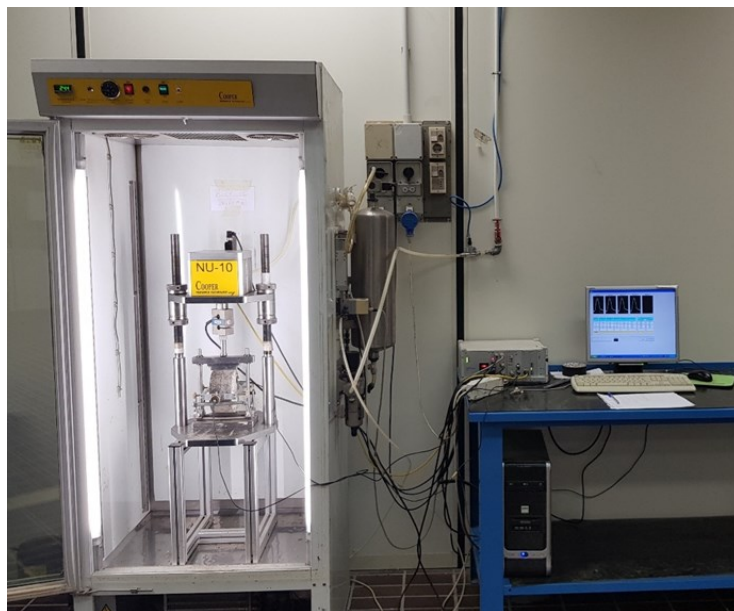


Fig. 3.23 - NAT

La prova viene effettuata su due diametri del provino (con angolo tra i due di 90°), e durante questa si presuppone che il conglomerato rimanga in campo elastico, rimanendo omogeneo ed isotropo. Il materiale si presenta come visco-elasto-plastico, ma essendo studiato a temperature inferiori a 25°C il modulo di rigidezza a trazione è uguale a quello a compressione, facendo sì che il materiale si comporti come un mezzo elastico lineare. Mediante il software dell'apparecchiatura, vengono automaticamente controllate tutte le variabili in gioco: tempo di picco (rise time), carico fissato, deformazione di target fissata (in questo caso 2 μm) o carico imposto, coefficiente di Poisson, temperatura di prova.

Prima dell'inserimento nel NAT il provino viene condizionato termicamente alla temperatura di prova desiderata, in accordo alla norma UNI EN 12697-26, per un tempo tale da far raggiungere la temperatura richiesta anche all'interno del provino (la differenza tra centro e superficie esterna non deve essere maggiore di 0,4°C). inoltre, mediante calibro viene definita l'altezza media del provino che verrà poi utilizzata dal software per lo studio dei dati ottenuti. Il provino nel NAT è sottoposto ad uno stato di sollecitazione visibile in figura 2.23.

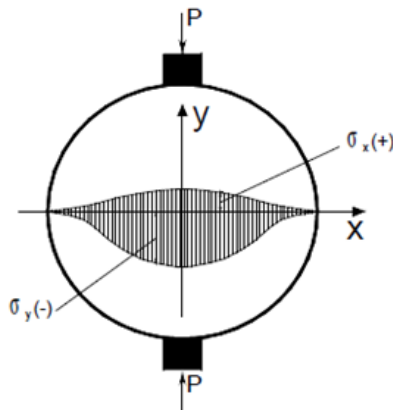


Fig.3.24 - Stato di sollecitazione indotto al provino

Le sollecitazioni massime e medie di trazione (lungo x) e compressione (lungo y) sono definite mediante le formule:

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

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

Dove:

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

Inoltre, si definisce il modulo di rigidezza elastica in termini di deformazione di un elemento soggetto a stato biassiale di tensione. La deformazione orizzontale $\epsilon_{x,\text{media}}$ dell'elemento è:

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

Dove:

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

Dalle formule ottenute e considerando la deformazione orizzontale Δ data dal prodotto del diametro del provino per $\epsilon_{x,media}$ otteniamo:

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

Si può allora ricavare il modulo elastico come indicato nella seguente equazione:

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

Dove, il carico P è caratterizzato dai parametri sottoindicati (figura 3.38).

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

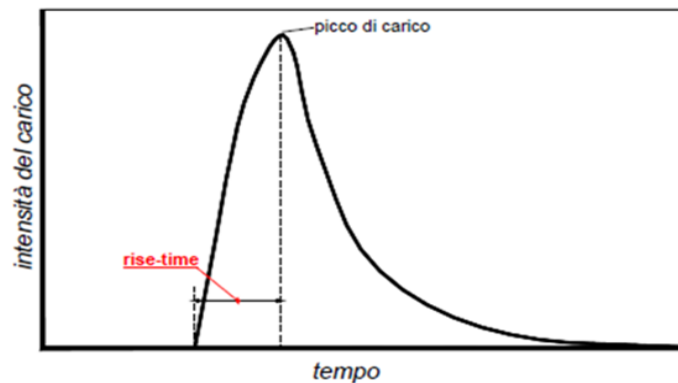


Fig. 3.25 – parametri caratterizzanti del carico

Tale modulo così calcolato, subisce da parte del software una correzione data da un fattore k che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata, mediante la formula:

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

Dove:

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

Il NAT si compone di una camera climatica a 20°C per il condizionamento del provino, una cella di carico, un pistone ed un castelletto per il posizionamento del provino e per il montaggio dei trasduttori, la cui presenza permette di evidenziare le deformazioni nella direzione ortogonale rispetto a quella di applicazione del carico.

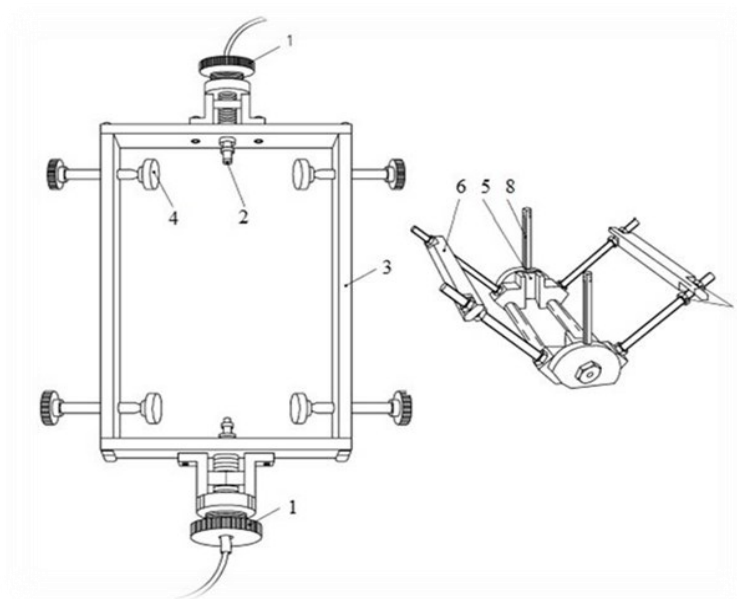


Fig. 3.26- Castelletto per il posizionamento del provino

Da tale figura è possibile notare: il telaio (3) che ha la funzione di sostenere il provino, centrato mediante delle viti (4) e la base di appoggio (5). I trasduttori (2) sono posizionati nei due fori e serrati con delle viti (1). Il telaio poggia su delle barre di appoggio (6) regolate da ulteriori viti (7)

Si inserisce quindi il provino nel castelletto e lo si fissa:



Fig. 3.27 - castelletto contenente il provino

Il provino viene poi inserito nel NAT:



Fig. 3.28 - Provino posizionato nel NAT

Inserito il provino, il NAT è dotato di un sistema software di controllo e acquisizione dati, per cui inizialmente è necessario inserire dei parametri relativi alla tipologia di provino:

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

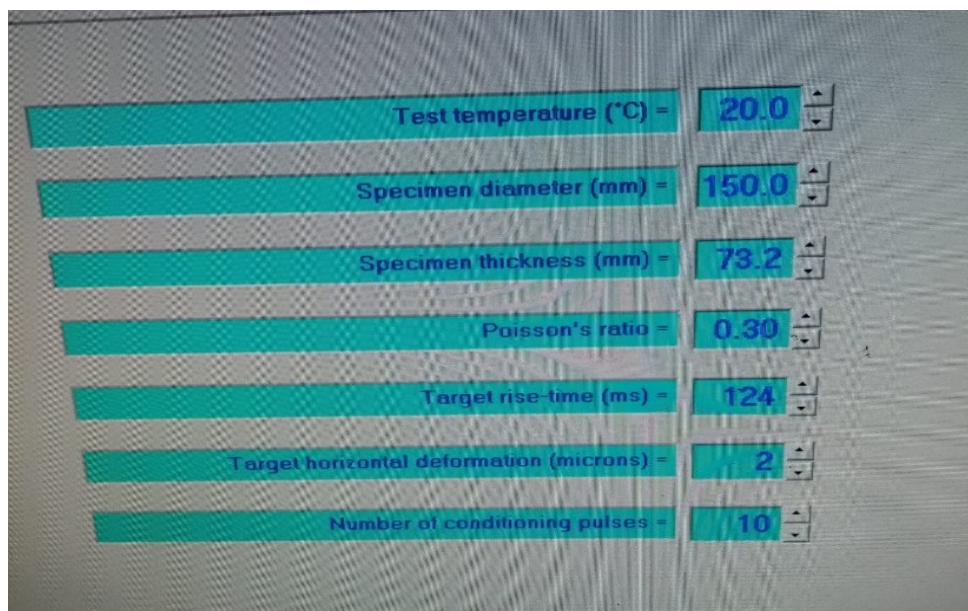


Fig 3.29 -. Schermata di input del software ITSM

Inseriti i dati, si porta, mediante il pulsante “make contact”, il pistone a contatto con il provino, producendo una sollecitazione di precarico di 30 N.

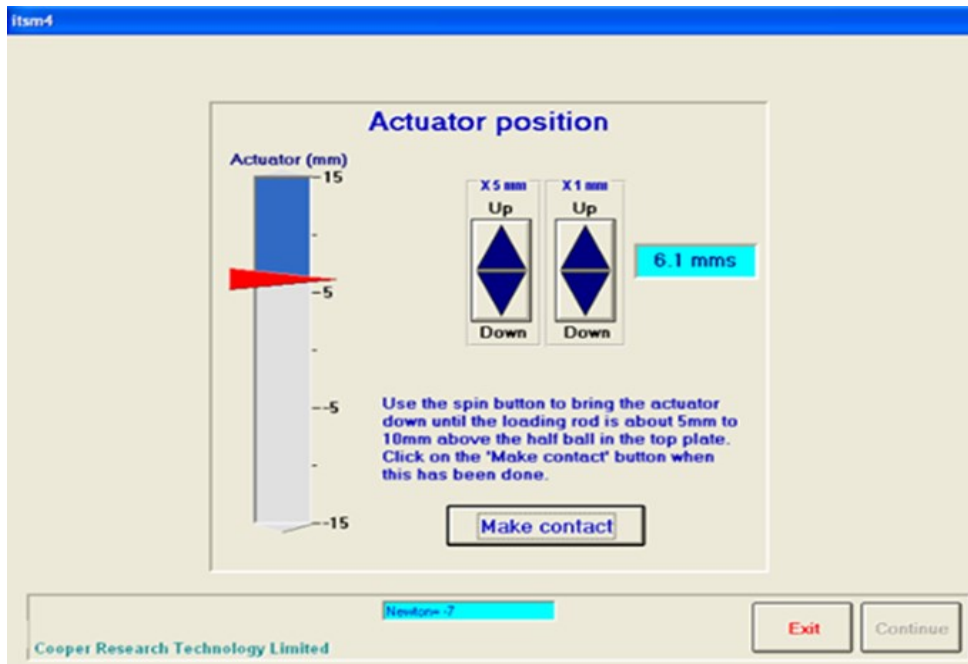


Fig. 3.30 - Schermata con pulsante “Make contact”

Si collegano poi i trasduttori in modo da ottenere una corretta misura della deformazione orizzontale. Dal display si può determinare l'esatta posizione del trasduttore, che è giusta quando questo viene rappresentato da una freccia rossa.

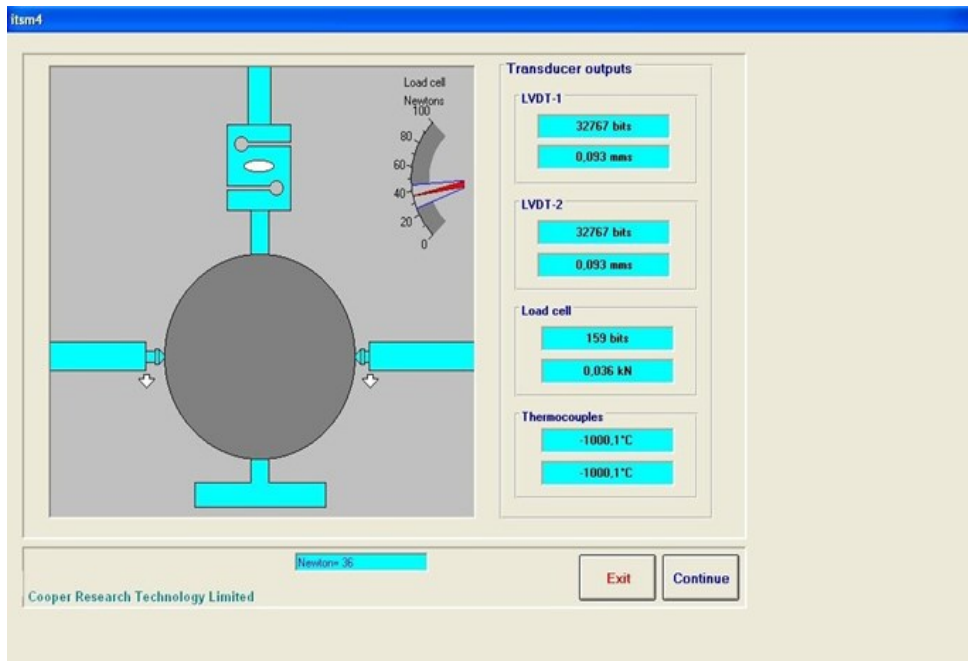


Fig. 3.31 - Trasduttori non regolati

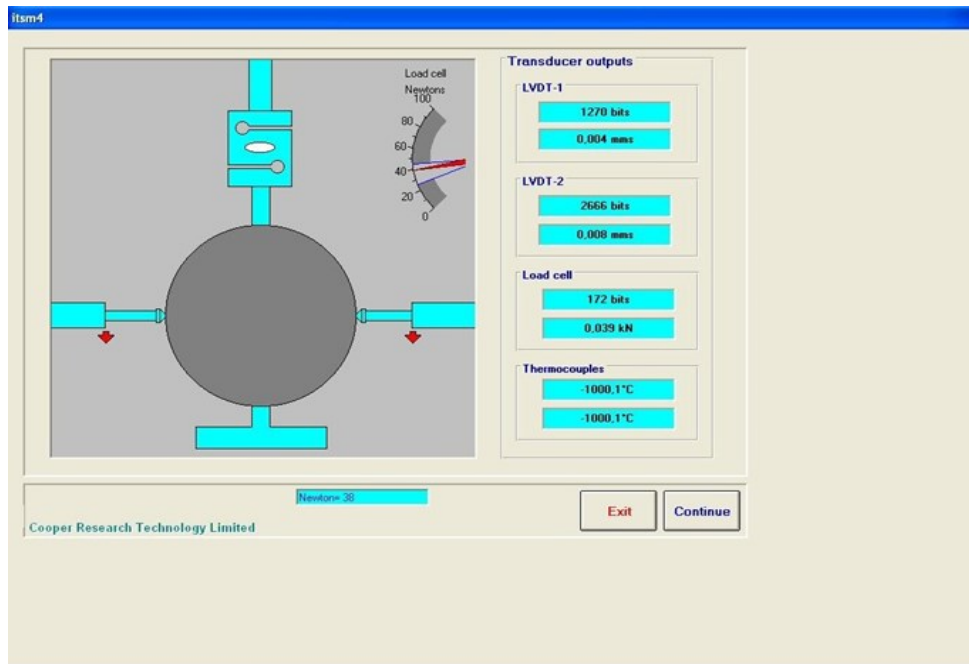


Fig. 3.32 - Trasduttori regolati

Una volta controllato che la temperatura nella camera climatica sia di 20°C, con massimo discostamento di 0,5°C, si applicano dieci impulsi di precarico.

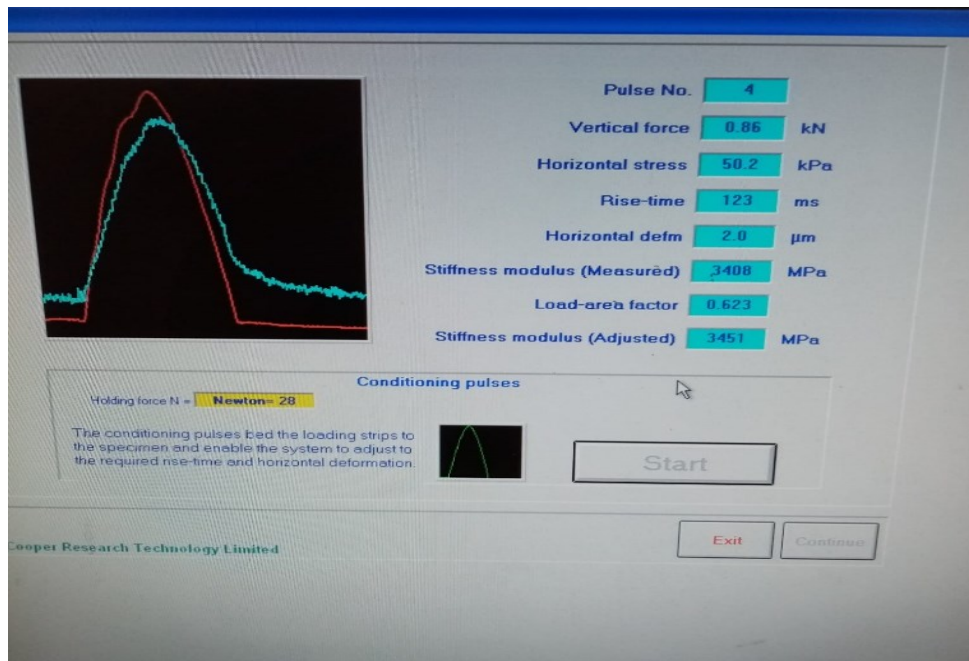


Fig. 3.33 - Quadro degli impulsi di precarico

Nella fase finale, si individuano per i cinque impulsi di prova, i parametri precedentemente descritti con i rispettivi valori medi.

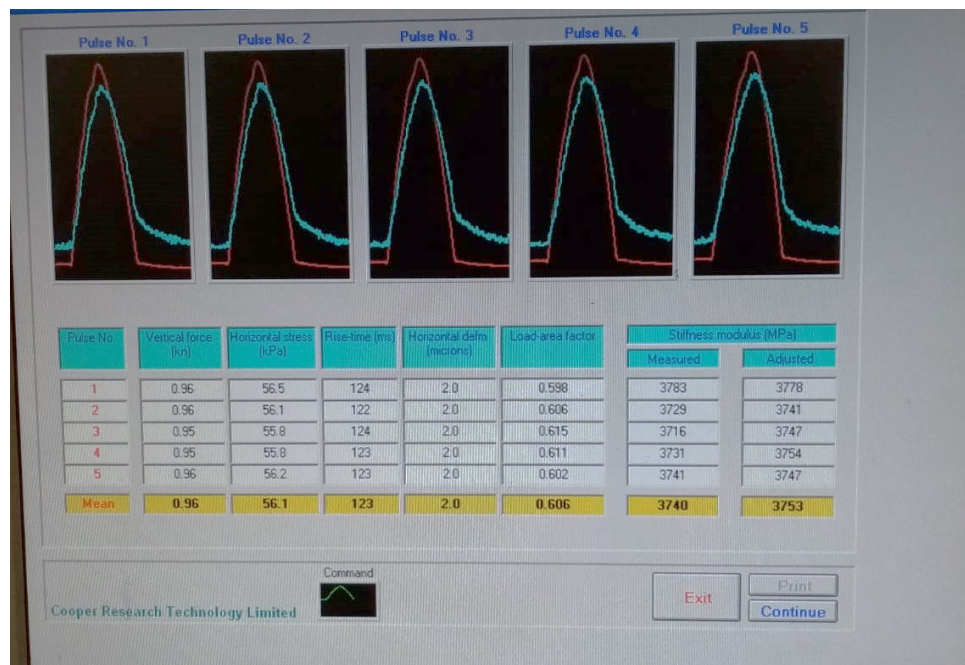


Fig. 3.34 - Visualizzazione grafica dei cinque impulsi di prova

Il provino viene poi ruotato di un angolo di $90^\circ \pm 10^\circ$ e si ripete la procedura descritta ottenendo così i dati utili alla prova. I valori di ITSM calcolati sui due diametri non devono differire più del 20%. Inoltre, dalla loro media si ottiene il modulo di rigidezza a trazione indiretta definitivo.

3.2.5 prova di rottura a trazione indiretta (ITS)

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

La prova di trazione indiretta viene effettuata a una temperatura che varia tra 5°C e 25°C . Durante l'esperimento, 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, risulti avere la stessa temperatura. L'attrezzatura utilizzata per la prova è costituita da un sistema di carico composto da due piastre parallele infinitamente rigide. Le sollecitazioni sono applicate al provino mediante due "barrette", ovvero dei 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 entrambe si trovano nello stesso piano verticale dell'asse del campione.



Fig. 3.35 - Posizionamento provino

La testa di carico si muove ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. L'attrezzatura rileva sia la deformazione risultante dalla trazione e dalla compressione del campione durante l'applicazione dello stress, sia la forza massima esercitata in fase di compressione fino alla rottura del materiale.

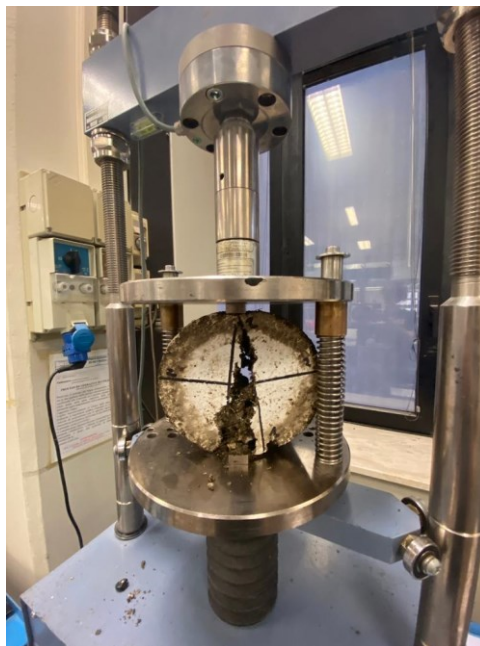


Fig. 3.36 - Provino rotto con prova di trazione indiretta

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

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

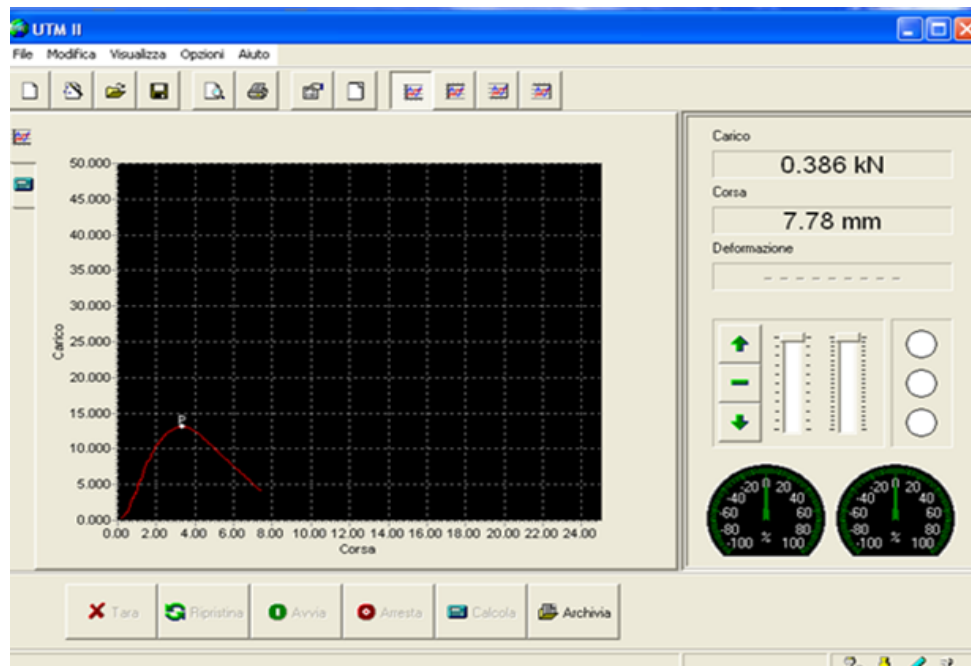


Fig. 3.37 - Curva carico-corsa

L'ITS viene calcolato mediante la seguente formula:

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

dove:

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

3.2.5.1 CTI e CTindex

Il CTI (coefficiente di trazione indiretta) è un parametro indicante la pendenza della retta secante la curva di fig. 3.37, partente dall'origine e che incrocia il punto massimo della curva. Tale pendenza, in questo diagramma forza-deformazione definisce la rigidezza (modulo). Il problema è che i risultati ottenuti sono da correggere a causa del fatto che 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 rigidezza ottenuta. Di conseguenza mediante dei fogli Excel si va a correggere l'errore generato e successivamente si può ottenere il valore dell'indice CTI desiderato mediante la seguente 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 coefficiente che dipende dall'energia sottesa alla curva di rottura derivante dalla prova ITS, oltre che dalle dimensioni del provino, ed è individuato dalla seguente formula:

$$CT_{Index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \left(\frac{l_{75}}{D} \right)$$

3.3 nomenclatura provini

I provini confezionati nel presente studio sono stati nominati come segue:

$$\alpha F \beta \gamma \delta$$

Dove:

- α = A,B,C (numero impasto)
- F indica la presenza di fibre nella miscela
- β = 1,2 (tipologia fibre)
- γ = 0,2% (% fibre)
- δ = 1-15 (numero provino)

3.4 miscela di progetto

Nel seguente paragrafo vengono riportate la granulometria di progetto e le ricette utilizzate per la realizzazione dei diversi impasti.

3.4.1 curva granulometrica di progetto

La ricetta granulometrica di progetto è stata determinata facendo riferimento al Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano, per il quale la curva, ottenuta variando le percentuali delle varie pezzature di aggregati, deve essere contenuta all'interno di un fuso granulometrico delimitato da una curva superiore ed una inferiore. Il fuso è utilizzato in modo da combinare le varie classi di inerti per ottenere così una curva che consenta l'ottimale addensamento del conglomerato bituminoso. Dalle curve granulometriche dei singoli inerti utilizzati, e dai limiti del fuso granulometrico, mediante un foglio Excel si è potuta determinare la curva di progetto e ricavare le percentuali in peso degli aggregati da inserire. Da qui sono state calcolate le quantità in grammi.

La miscela è quindi costituita da:

- RAP fino Lucidi in quantità pari al 44,9% in peso della miscela;
- RAP grosso Lucidi in quantità pari al 42,2% in peso della miscela;
- RAP 16/20 in quantità pari al 7,02% in peso della miscela;
- Filler di recupero pari al 5,8% in peso della miscela.

Di seguito si riporta la granulometria utilizzata per la miscela:

	<u>FINO_Lucidi</u>	<u>GROSSO_Lucidi</u>	16-20	Filler di recupero_2	Mix di progetto
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100	100,0
16	100,0	86,5	0,0	100	87,3
10	98,1	62,7	0,0	100	76,4
8	93,3	49,7	0,0	100	68,7
4	71,1	22,3	0,0	100	47,2
2	45,4	0,0	0,0	100	26,2
1	22,5	0,0	0,0	100	15,9
0,5	8,9	0,0	0,0	100	9,8
0,25	3,8	0,0	0,0	99,1	7,5
0,125	1,6	0,0	0,0	92,4	6,1
0,063	1,1	0,0	0,0	79,3	5,1

Tabella 3.3- granulometria relativa alle componenti della miscela di progetto

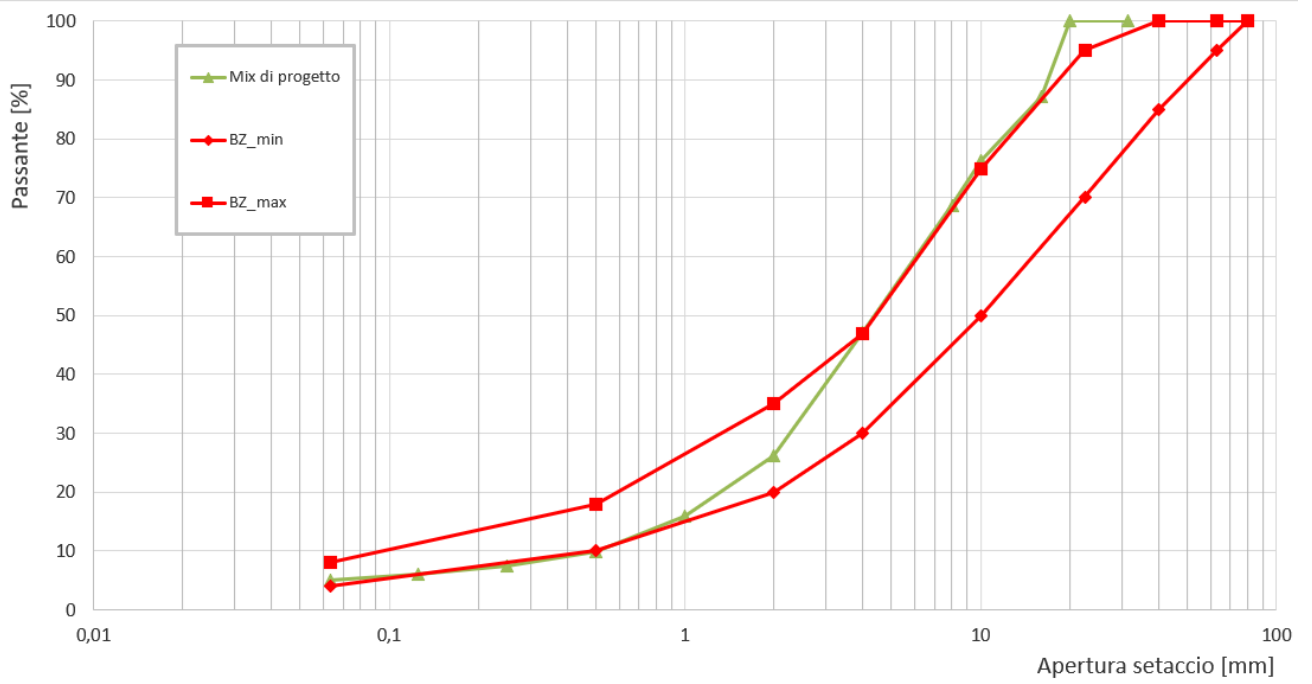


Fig. 3.38.- Curva granulometrica di progetto

Capitolo 4 – Analisi dei risultati

Nel seguente capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dall'attività sperimentale. All'interno del periodo di ricerca sono state realizzate due miscele, contraddistinte principalmente per la tipologia di fibre utilizzate. Per ognuna delle due miscele sono stati realizzati tre impasti distinti e per ogni impasto sono stati confezionati cinque provini, per un totale di 30 campioni.

Le prove a cui sono stati sottoposti sono di seguito elencate:

- perdita di acqua dopo la compattazione e nei successivi tre, sette, quattordici e trenta giorni;
- proprietà volumetriche;
- prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) dopo tre, sette, quattordici e trenta giorni di maturazione post compattazione;
- prove di rottura a trazione indiretta (ITS) a tre, sette, quattordici e trenta giorni dopo la compattazione.

Si evidenzieranno poi le differenze principali tra un impasto di riferimento, privo di fibre, ed i due impasti sperimentali con l'aggiunta rispettivamente di fibre PFU (fibra 1) e PF Readymesh (fibra 2).

4.1 Perdita di acqua

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

4.2.1 impasto con fibra 1

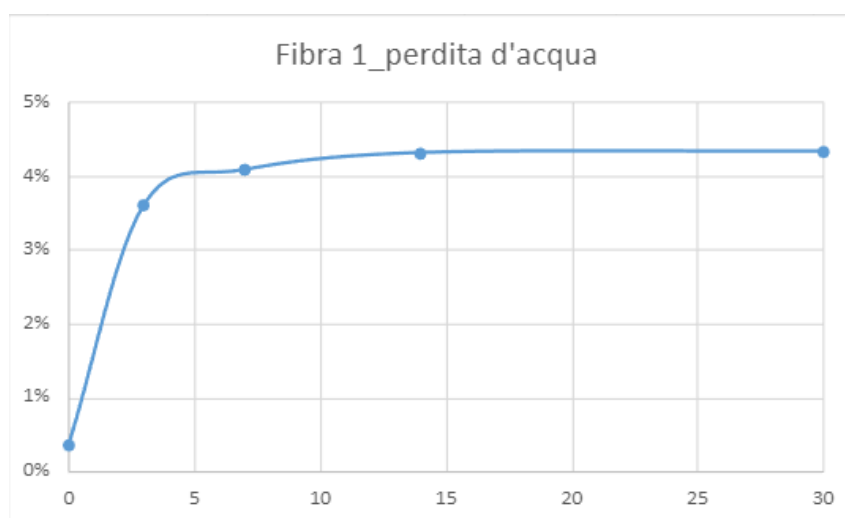


Fig. 4.1 – Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto con fibra 1

4.1.2 impasto con fibra 2

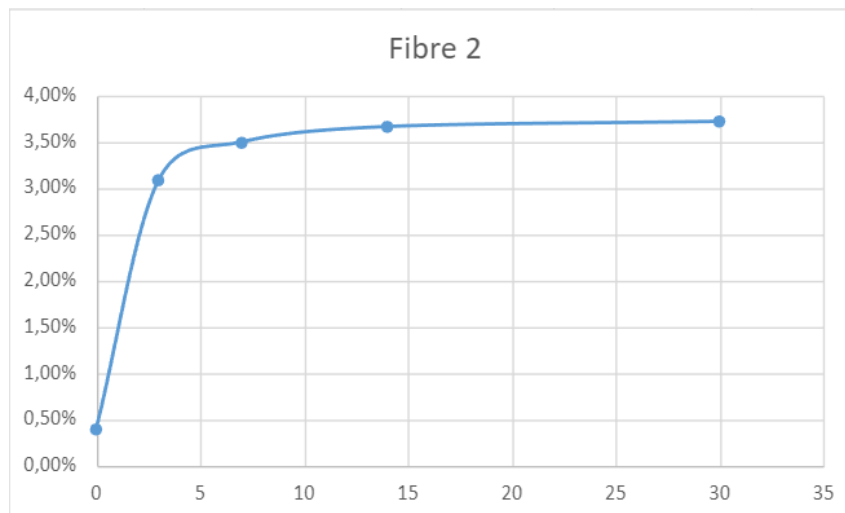


Fig. 4.2 – Perdita di acqua nel tempo relativa ai provini dell'impasto con fibra 2

Come è possibile notare dai precedenti grafici, il processo di evaporazione che avviene all'interno di entrambe le miscele tende ad attenuarsi già dopo 7 giorni di maturazione.

4.2 Proprietà volumetriche

Le proprietà volumetriche vengono riportate suddividendo le diverse miscele, raggruppando quindi gli impasti del medesimo mix design.

4.2.2 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. 4.3 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto con fibra 1

4.2.2 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. 4.4 – Determinazione della massa volumica apparente geometrica e del volume dei vuoti dei provini dell'impasto con fibra 2

4.2.3 Confronto

La figura che segue illustra il variare del volume dei vuoti in funzione della tipologia di fibre inserite. In generale l'inserimento di fibre comporta un miglioramento del grado di compattazione dei vuoti. Tra le due, la fibra 2 è quella che consente di ottenere miscele più chiuse (12.5% per fibra 2 contro 13% e 14% circa per la fibra 1 ed il riferimento rispettivamente).

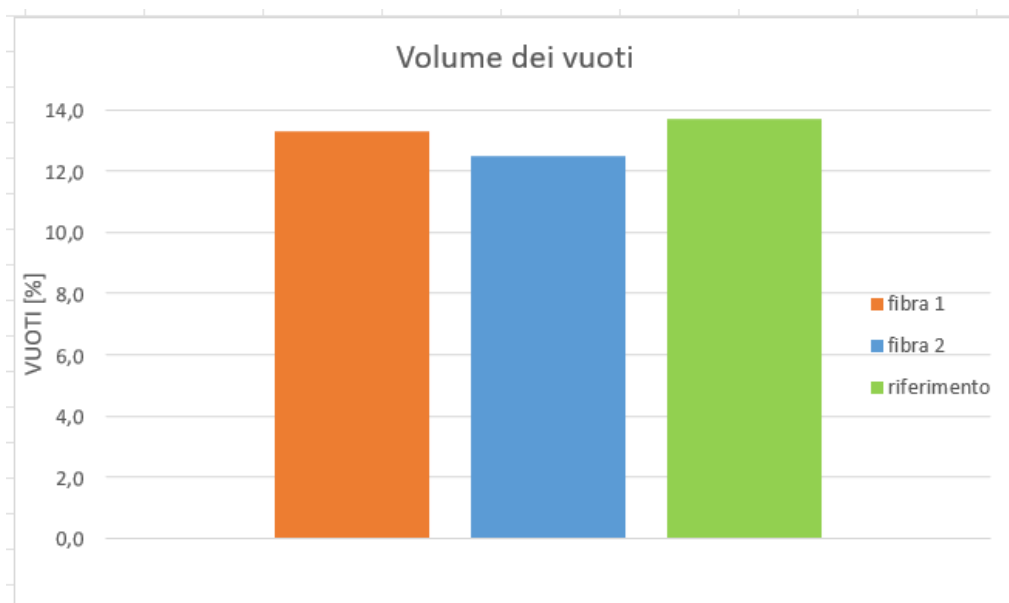


Fig. 4.3 – Volume dei vuoti delle tre miscele a confronto

4.3 - Prove di modulo di rigidità a trazione indiretta

I risultati della prova di modulo a trazione indiretta, eseguita a tre, sette, quattordici e trenta giorni vengono presentati ancora una volta distinguendo tre grandi famiglie:

- ❖ Impasto di riferimento con 0% di fibre
- ❖ Impasto con fibra 1
- ❖ Impasto con fibra 2

4.3.1 impasto con fibra 1

Codice provini	a 3 gg			a 7 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF0,05_1	2253	2036	2144,5	2940	2764	2852
AF0,05_3	2545	2281	2413	3259	3191	3225
AF0,05_5	2386	2347	2366,5	3151	3205	3178
BF0,05_7	2545	2340	2442,5	3160	3258	3209
BF0,05_9	2832	2816	2824	3531	3655	3593
BF0,05_11	2342	2469	2405,5	3126	3194	3160
CF0,05_13	2439	2568,5	2503,75	3156	3109	3132,5
CF0,05_15	2532	2504	2518	3190	3331	3260,5
		Media	2452,219		Media	3201,25

Tabella. 4.5 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 3 e 7 giorni

Codice provini	a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF0,05_1	3349	3265	3307	3286	3471	3379
AF0,05_3	3907	3775	3841	-	-	-
AF0,05_5	4141	3813	3977	3561	3642	3602
BF0,05_7	3437	3477	3457	3473	3520	3497
BF0,05_9	4423	4273	4348	4334	4129	4232
BF0,05_11	4091	4150	4120,5	3862	3696	3779
CF0,05_13	3920	3679	3799,5	3895	3424	3660
CF0,05_15	3855	4005	3930	-	-	-
		Media	3847,5		Media	3691,083

Tabella. 4.6 – Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 14 e 30 giorni

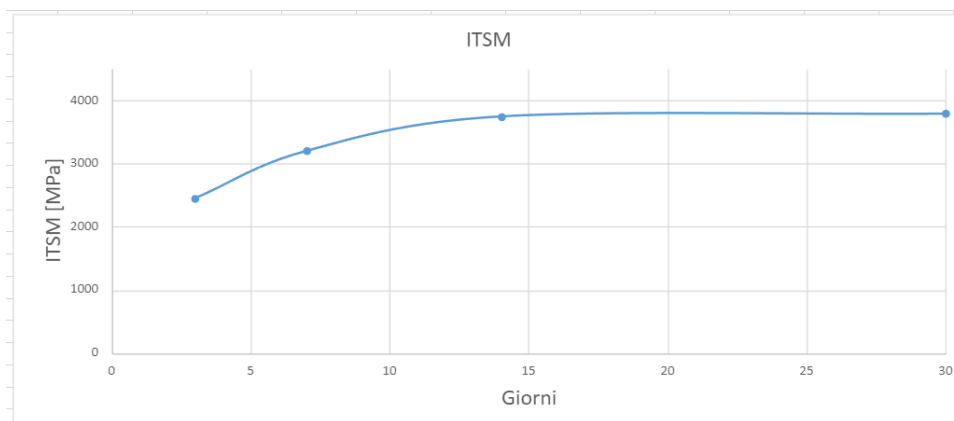


Fig. 4.4 – Valori di ITSM nel tempo relativi all'impasto con fibre 1

4.3.2 impasto con fibra 2

Codice provini	a 3 gg			a 7 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF0,05_1	2531	2446	2489	3089	3362	3226
AF0,05_3	2893	2922	2908	3542	3324	3433
AF0,05_5	3244	3130	3187	4018	4236	4127
BF0,05_7	2595	2368	2482	3397	3497	3447
BF0,05_9	2494	2405	2450	3316	3101	3209
BF0,05_11	3157	2893	3025	3744	3841	3793
CF0,05_13	2791	2850	2821	3920	3789	3855
CF0,05_15	3190	3255	3223	4010	4009	4010
		Media	2823		Media	3637

Tabella. 4.7 - Valori di ITSM relativi ai provini dell'impasto con fibra 2 a 3 e 7 giorni

Codice provini	a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AF0,05_1	4259	4042	4151	4095	4221	4158
AF0,05_3	4150	3873	4012	-	-	-
AF0,05_5	4385	4498	4442	4812	4584	4698
BF0,05_7	3763	3774	3769	4118	4058	4088
BF0,05_9	-	-		2728	3358	3043
BF0,05_11	4115	4433	4274	5056	4829	4943
CF0,05_13	4381	3986	4184	4673	4344	4509
CF0,05_15	4588	4323	4456	-	-	-
		Media	4184		Media	4240

Tabella. 4.8 – Valori di ITSM relativi ai provini dell’impasto con fibra 2 a 14 e 30 giorni

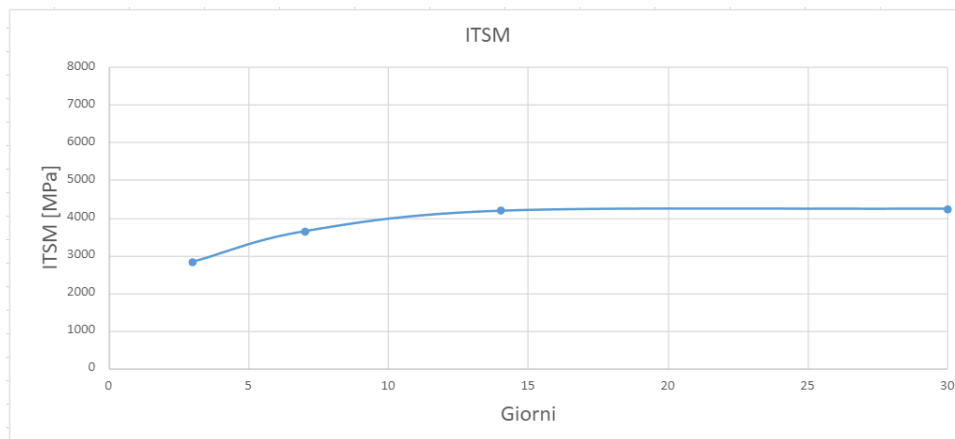


Fig. 4.5 – Valori di ITSM nel tempo relativi all’impasto con fibre 2

4.3.3 Confronto

Di seguito viene evidenziato come varia il valore dell'ITSM a tre e trenta giorni in funzione della tipologia di fibre presenti nell'impasto.

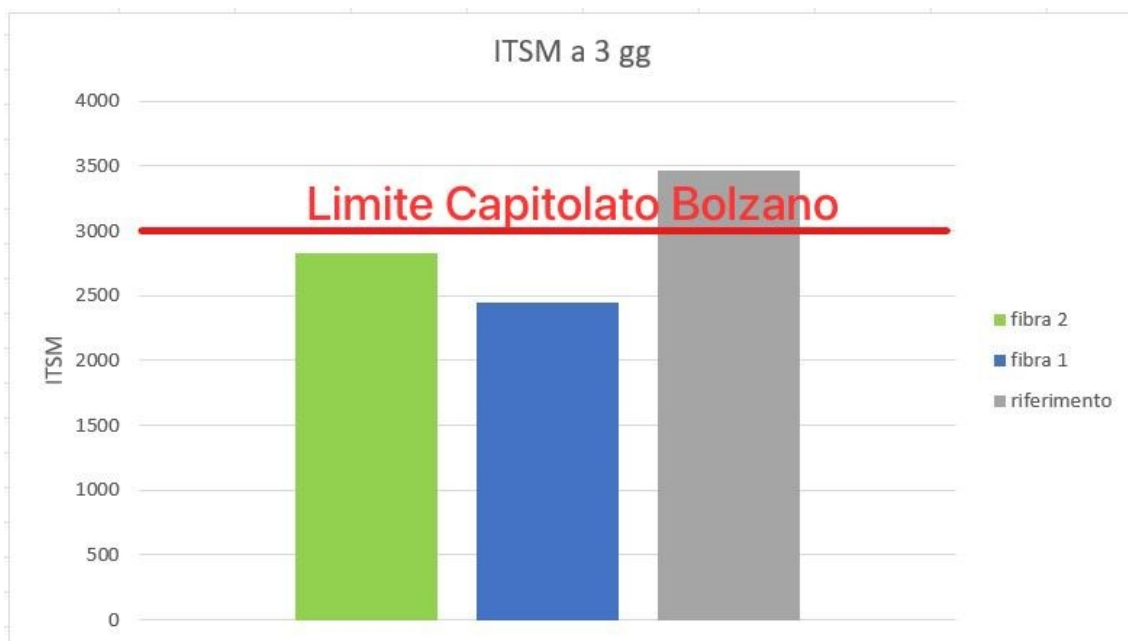


Fig. 4.6 – Valori di ITSM a 3 giorni delle tre miscele messe a confronto

La linea rossa rappresenta il minimo valore di ITSM a tre giorni secondo il Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano, corrispondente anche a quello del Capitolato ANAS. Di conseguenza i provini confezionati con le fibre 1 e 2 non risultano idonei.

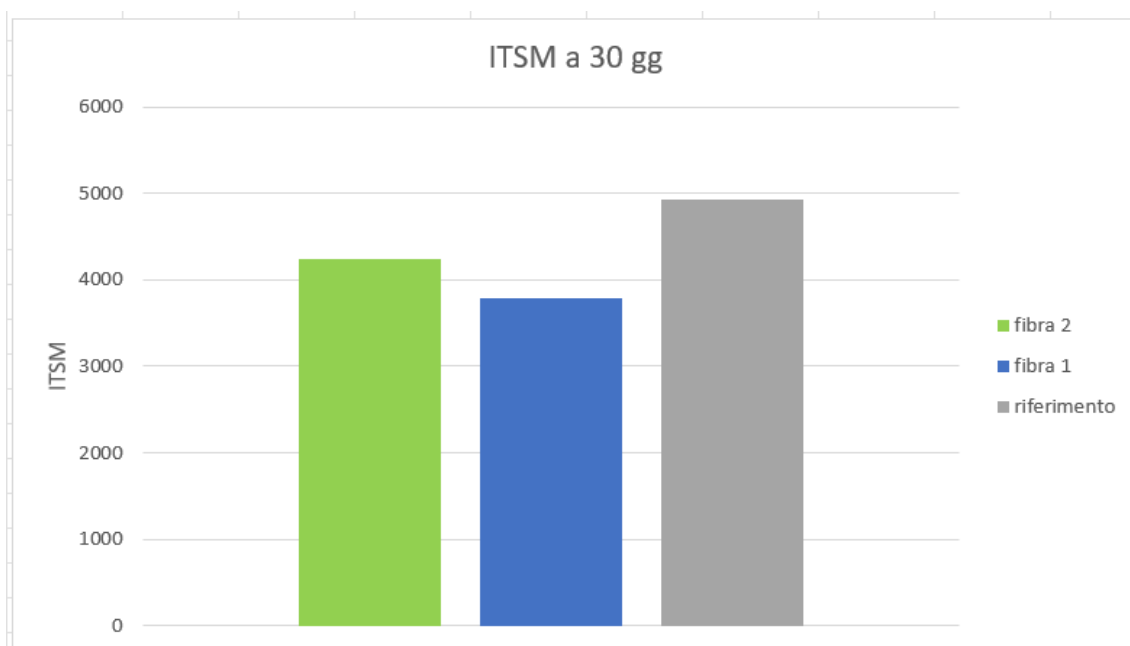


Fig. 4.7 – Valori di ITSM a 30 giorni delle tre miscele messe a confronto

Alla maturazione di trenta giorni è possibile notare come i provini confezionati con la fibra 2 presentino un valore di ITSM maggiore di quelli con fibra 1. Entrambe le miscele con fibre mostrano una rigidità di gran lunga inferiore a quella del materiale senza fibre (15% per fibra 2 e 20% per fibra 1).

4.4 - Prove di rottura a trazione indiretta

Nella seguente sezione si analizzano i risultati della prova di rottura a trazione indiretta, eseguita a tre, sette, quattordici e trenta giorni, distinguendo le due miscele di studio:

- Impasto 1 (0,2% di fibre in PFU)
- Impasto 2 (0,2% di fibre in PF)

4.4.1 impasto 1

a 3 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF1_0,2_2	0,022	4,116	0,241
BF1_0,2_8	0,019	5,286	0,306
CF1_0,2_14	0,021	4,660	0,273
		Media	0,273

Tabella. 4.9 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 3 giorni

a 7 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF1_0,2_4	0,020	5,690	0,334
BF1_0,2_10	0,022	6,216	0,362
CF1_0,2_12	0,021	6,202	0,364
		Media	0,353

Tabella. 4.10 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 7 giorni

a 14 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF1_0,2_3	0,043	5,623	0,33
BF1_0,2_6	0,022	6,565	0,388
CF1_0,2_15	0,020	6,480	0,378
		Media	0,365

Tabella. 4.11 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 14 giorni

a 30 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF1_0,2_1	0,020	4,906	0,28
BF1_0,2_9	0,015	6,325	0,37
CF1_0,2_13	0,032	6,304	0,369
		Media	0,370

Tabella. 4.12 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 30 giorni

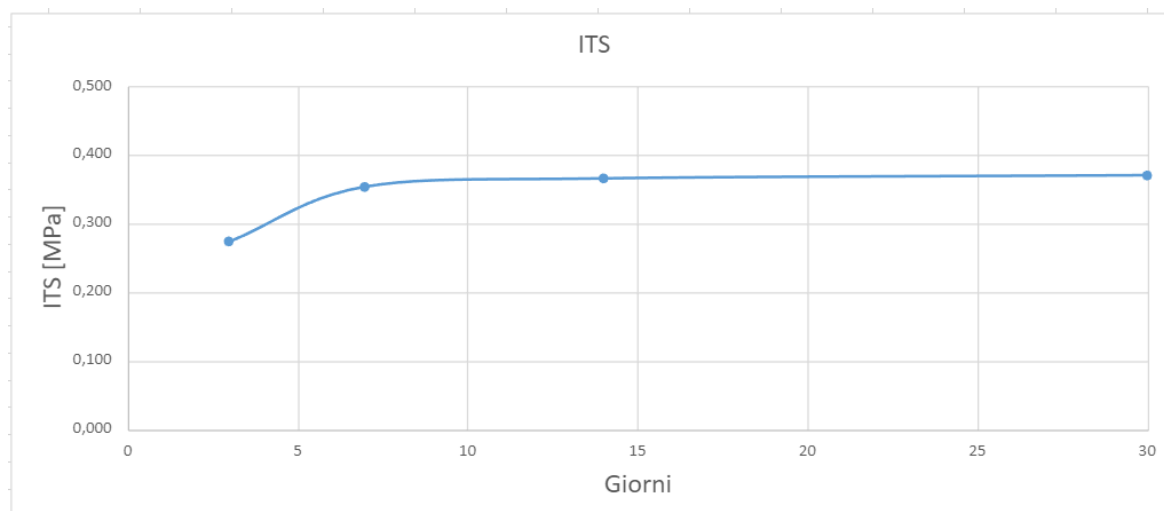


Fig. 4.8 - Valori di ITS nel tempo relativi all'impasto con fibra 1

4.4.2 impasto 2

a 3 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF2_0,2_2	0,027	7,574	0,448
BF2_0,2_8	0,021	6,708	0,394
CF2_0,2_14	0,032	7,237	0,429
		Media	0,424

Tabella. 4.13 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 2 a 3 giorni

a 7 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF2_0,2_4	0,077	7,173	0,426
BF2_0,2_10	0,027	5,888	0,346
CF2_0,2_12	0,025	7,918	0,462
		Media	0,411

Tabella. 4.14 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 2 a 7 giorni

a 14 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF2_0,2_3	0,040	7,508	0,441
BF2_0,2_6	0,065	8,122	0,48
CF2_0,2_15	0,064	9,240	0,545
		Media	0,489

Tabella. 4.15 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 2 a 14 giorni

a 30 gg			
Codice provini	ϵ_c	P_{max} [Kn]	ITS [MPa]
AF2_0,2_1	0,019	8,571	0,503
BF2_0,2_7	0,018	7,380	0,434
CF2_0,2_13	0,017	8,313	0,491
		Media	0,476

Tabella. 4.16 – Valori ITS relativi ai provini dell'impasto con fibra 2 a 30 giorni

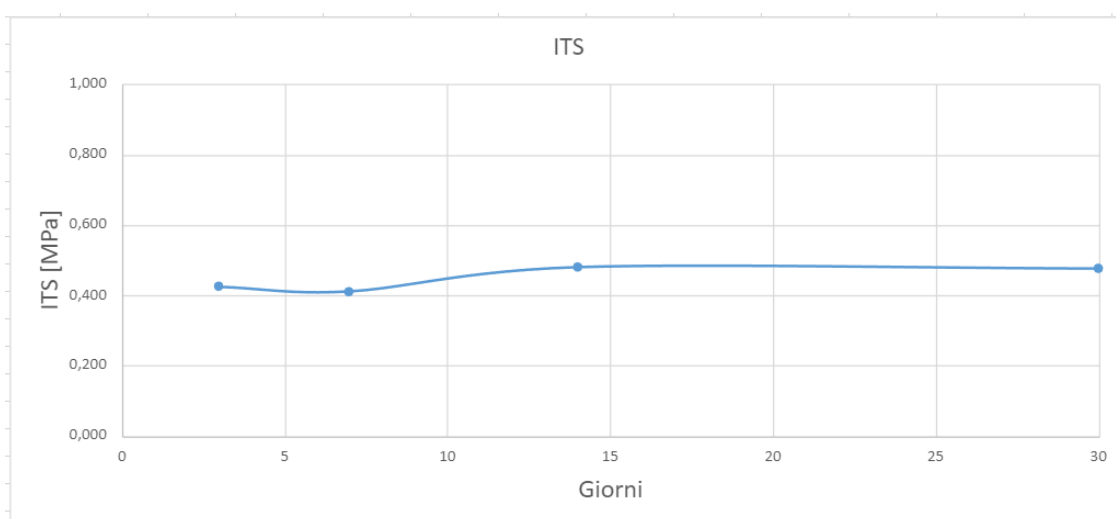


Fig. 4.9 - Valori di ITS nel tempo relativi all'impasto con fibra 2

4.4.4 Confronto

Nei seguenti grafici si andranno ad analizzare le differenze tra le due miscele oggetto di studio ed il riferimento. In particolare, si illustrano i valori di ITS a tre, sette, quattordici e trenta giorni.

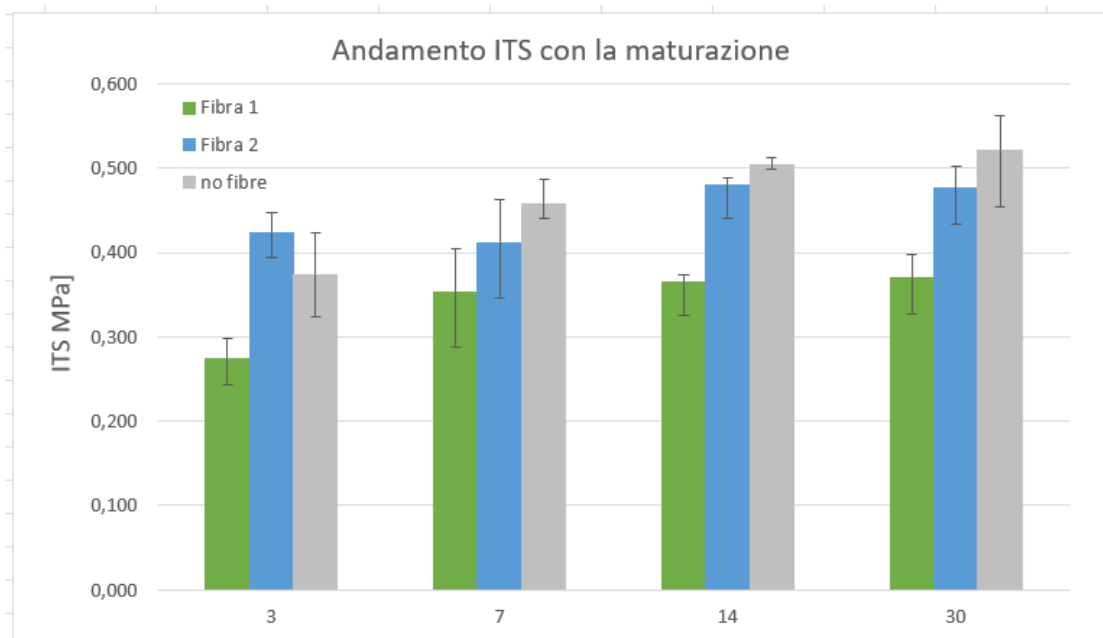


Fig. 4.10 - Valori di ITS a 3,7,14,30 giorni



Fig. 4.11 – Valori di ITSM a 3 giorni delle tre miscele messe a confronto

Dal confronto della miscela senza fibre e le altre due con l'aggiunta di fibre è possibile notare prima di tutto che le prestazioni del materiale aumentano nel tempo a seguito dei meccanismi di reazione del cemento con l'acqua (processo di maturazione). Tra le due tipologie di fibre, quella 1, è quella

che garantisce prestazioni superiori (circa il 30% in più della fibra 2 dopo 3 giorni di maturazione), seppur di poco inferiori alle prestazioni della miscela di riferimento.

4.5 Calcolo CTI e CT-index

La prova a rottura restituisce una curva su un grafico forza-spostamento, da cui è possibile ricavare l'indice CTI, che è un valore in funzione della pendenza della retta passante per l'origine ed il valore massimo della curva, e il valore CT-index, indicante l'energia sottesa alla curva di rottura derivante dalla prova ITS.

4.5.1 impasto con fibra 1

a 3 gg		
codice provini	CTI	CTindex
AF1_0.2_2	21,15536	62,74144
BF1_0.2_8	31,43885	42,62878
CF1_0.2_14	26,26532	32,2518

Tabella. 4.17 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 3 giorni

a 7 gg		
Codice provini	CTI	CTindex
AF1_0.2_4	30,496295	37,02027
BF1_0.2_10	30,141008	41,02349
CF1_0.2_12	31,229961	47,14738

Tabella. 4.18 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 7 giorni

a 14 gg		
Codice provini	CTI	CTindex
AF1_0.2_3	14,27605	28,2
BF1_0.2_6	33,84908	38,31023
CF1_0.2_15	35,78454	27,14736

Tabella. 4.19 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 14 giorni

a 30 gg		
Codice provini	CTI	CTindex
AF1_0.2_1	26,63119	100,6
BF1_0.2_9	46,44895	14,8
CF1_0.2_13	36,31786	27

Tabella. 4.20 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell'impasto con fibra 1 a 30 giorni

4.5.2 impasto con fibra 2

a 3 gg		
Codice provini	CTI	CTindex
AF2_0.2_2	36,294	108,4
BF2_0.2_8	40,288	67,9
CF2_0.2_14	28,952	67,9

Tabella. 4.21 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell'impasto con fibra 2 a 3 giorno

a 7 gg		
Codice provini	CTI	CTindex
AF2_0.2_4	43,2025	237,7
BF2_0.2_10	30,0660	303,8
CF2_0.2_12	42,6656	63,9

Tabella. 4.22 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell’impasto con fibra 2 a 7 giorni

a 14 gg		
Codice provini	CTI	CTindex
AF2_0.2_3	47,862	227,9
BF2_0.2_6	40,485	167,8
CF2_0.2_15	49,099	98,4

Tabella. 4.23 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell’impasto con fibra 2 a 14 giorni

a 30 gg		
rovini	CTI	CTindex
AF2_0.2_1	33,60963	40,0
BF2_0.2_9	51,36604	54,3
CF2_0.2_13	36,31786	27,6

Tabella. 4.24 – Valori di CTI e CT-index relativi ai provini dell’impasto con fibra 2 a 30 giorni

4.5.3 Confronto

FIBRA 1		
maturazione	CTI	CT-index
3	26,288	45,874
7	30,267	41,730
14	44,233	31,219
30	49,050	20,906

Tabella. 4.25 – media valori CTI e CT-index durante la maturazione dell’impasto con fibra 1

FIBRA 2		
maturazione	CTI	CT-index
3	35,200	227,610
7	38,667	201,789
14	45,833	164,692
30	40,433	40,625

Tabella. 4.26 – media valori CTI e CT-index durante la maturazione dell’impasto con fibra 1

dalla media dei risultati ottenuti per entrambi gli indici sono stati ottenuti i seguenti grafici:

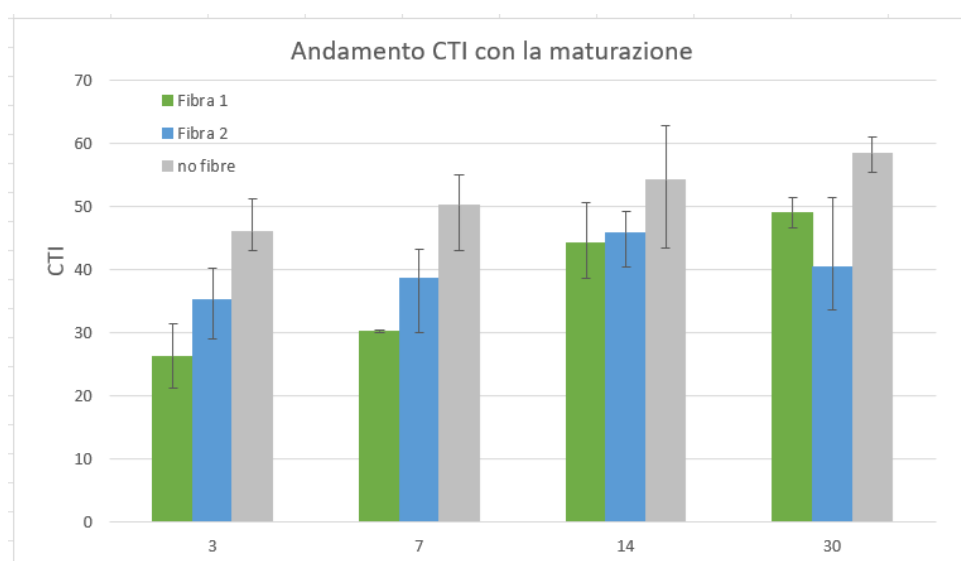


Fig. 4.12 - Andamento medio del CTI con la maturazione

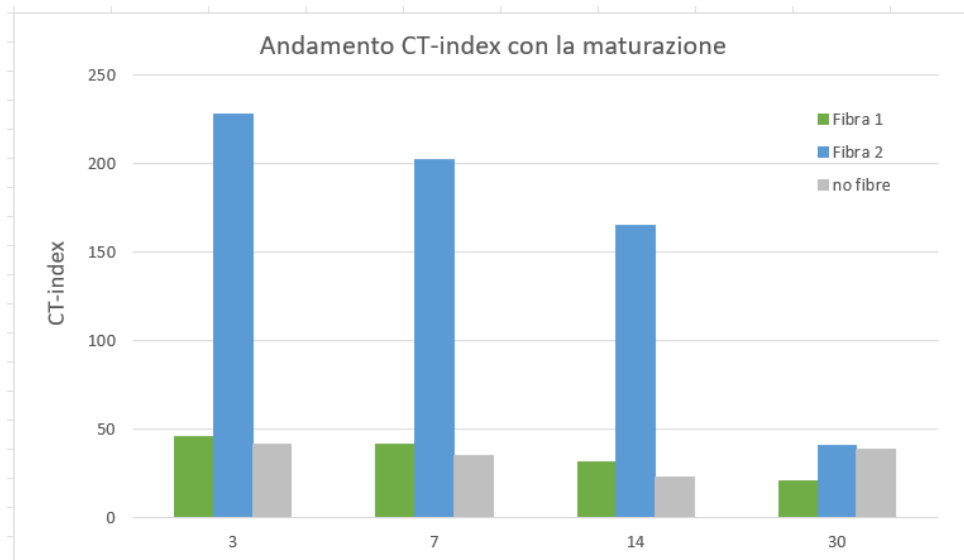


Fig. 4.13 - Andamento medio del CT-index con la maturazione

Dalle precedenti due tabelle si può notare che l’inserimento di fibre, di qualsiasi natura esse siano, comporta un peggioramento in termini di rigidità. Tuttavia, quando il confronto è realizzato in termini di energia assorbita prima della rottura (CT-index), le miscele con fibre 2 hanno una marcia in più (energia 5 volte maggiore rispetto alle altre due miscele). Questo è dovuto al fatto che le fibre 2 in qualche modo si oppongono allo sviluppo delle fessure all’interno del provino, ed una volta sviluppate svolgono un’azione chiamata “effetto ponte” che tende a tenere unite le estremità delle fessure, incrementando di molto l’energia di rottura.

Capitolo 5 – Conclusioni

L’attività sperimentale, condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade” dell’Università Politecnica delle Marche, è stata svolta al fine di studiare le prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo con l’inserimento di due tipologie differenti di fibre di rinforzo, in stessa quantità.

Per entrambi gli impasti sono stati realizzati 15 provini di diametro 150 mm. Sui provini sono state eseguite prove di:

- ❖ Modulo di rigidità a trazione indiretta ITSM dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- ❖ Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 3, 7, 14, 30 giorni

Dai risultati delle prove mostrate in questa attività sperimentale è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Dall'analisi volumetrica delle tre miscele non si evince una sostanziale differenza tra i tre materiale;
- I risultati della prova ITSM hanno mostrato come l'inserimento di fibre comporti una riduzione di rigidità;
- La prova di rottura a trazione indiretta ha evidenziato che l'inserimento di fibre comporta una riduzione di resistenza ITS (riduzione molto maggiore nel caso delle fibre 1) ed una riduzione della rigidità CTI; tuttavia, considerando il parametro CT-index si è visto un notevolissimo incremento impiegando la fibra 2.

Tali risultati rappresentano solamente la parte iniziale del lavoro di ricerca riguardo lo studio di conglomerati bituminosi riciclati a freddo con fibre di rinforzo. Il presente lavoro ha messo in luce come le fibre 2, e cioè quelle di tipo Readymesh PF, possano offrire maggiori garanzie e migliorare di gran lunga le prestazioni del materiale soprattutto in termini di resistenza a fatica. Tale lavoro andrà tuttavia incrementato con lo studio delle stesse miscele con prove di modulo di rigidità a varie temperature di prova e prove di resistenza a fatica. Infine, le stesse tipologie di fibre andranno testate in diversi quantitativi all'interno degli impasti.

Bibliografia

- [1] UNI EN 13108-8, 2016 - “Miscele bituminose. Specifiche dei materiali Asfalto rigenerato”;
- [2] UNI EN 933-1, 2012 - “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura”;
- [3] CNR BU 139, 1992 - “Percentuale di frantumato di aggregati”;
- [4] Ravaioli S. - “Emulsioni bituminose”, Siteb, Prima edizione, Settembre 2004;
- [5] PFU, fibre di Pneumatico Fuori Uso
https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/life/progetti_mese/progetto_mese_life_giugno2018_REFIBRE.pdf;
- [6] PF, fibre Readymesh PF [Scheda tecnica fibre Readymesh PF \(ITA\).pdf](#);
- [7] UNI EN 12697-5, 2019 - “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 5: Determinazione della massa volumica massima”;
- [8] UNI EN 12697-6, 2020 - “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi”;
- [9] UNI EN 12697-8, 2019 – “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”;
- [10] UNI EN 12697-26, 2018 - “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 26: Rigidezza”;
- [11] UNI EN 12697-23, 2018 - “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi”;
- [12] Capitolato Speciale d'appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano;

Ringraziamenti

Giunto al termine di questo percorso universitario è doveroso ringraziare coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo studio sperimentale e le persone che mi hanno supportato nel raggiungimento di questo obiettivo.

Desidero ringraziare in primis il mio relatore, Prof. Ing. Maurizio Bocci, per avermi dato la possibilità di svolgere questo interessante studio sperimentale e per la grande passione trasmessa nei suoi corsi, la quale mi ha spinto ad avvicinarmi con grande interesse all'ambito infrastrutturale.

I miei ringraziamenti vanno poi al correlatore di questa tesi, Dott. Ing. Carlo Carpani, per la grande passione, pazienza, e disponibilità con cui svolge il suo lavoro e con la quale mi ha aiutato e motivato in ogni giorno di tirocinio e di preparazione di questo elaborato.

Voglio dedicare questa tesi e tutto l'impegno per giungere a quest'obiettivo alla mia famiglia e voglio ringraziare tutti coloro che mi sono stati accanto durante questo percorso.