

Università Politecnica delle Marche



Corso di laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

CONFRONTO DI DUE EMULSIONI IMPIEGATO NEL RICICLAGGIO A FREDDO DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI DI RECUPERO.

*COMPARISON BETWEEN TWO TYPES OF EMULSIONS USED IN COLD RECYCLED
ASPHALT MIXTURES.*

RELATORE:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

CORRELATORE:

Ing. EMILIANO PROSPERI

TESI DI LAUREA DI:

Mohamad Yahya

2020/2021

Sommario

.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 2 - STATO DELL'ARTE DEL RICICLAGGIO A FREDDO	4
2.1 La pavimentazione.....	4
TIPOLOGIE DI TERRENO PER SOTTOFONDO:.....	8
2.2 Il Fresato stradale:	9
2.3 Riciclaggio a freddo.....	9
CAPITOLO 3 MATERIALI	14
3.1 Operazioni eseguite.....	14
3.2 Materiali	14
3.2.1- Sabbia	15
3.2.2 Fresato	16
3.2.3 Cemento	18
3.2.4 filler calcareo	19
3.2.5 Acqua	20
3.2.6 emulsione	20
CAPITOLO 4 - PROGRAMMA SPERIMENTALE	25
4.1 Preparazione miscela.....	25
4.2 Realizzazione provini	28
4.6 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23).....	41
CAPITOLO 5 - RISULTATI	44
5.1 Miscele con emulsione normale:.....	44
-Capitolo 6	53
Conclusioni:	53
Ringraziamento:	53

CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE

Il trasporto stradale ha avuto uno sviluppo notevole negli ultimi decenni a causa dell'aumento del traffico commerciale (veicoli pesanti) sulle strade. Non possiamo dimenticare le condizioni meteorologiche di pioggia, nebbia, umidità... tutti questi fattori giocano un ruolo importante sullo stato delle strade. fenomeni

atmosferici o catastrofici (es: piogge, gelo-disgelo, neve, terremoti...) non hanno fatto altro che accentuare il degrado delle pavimentazioni tali da rendere inevitabili gli interventi di manutenzione.

Negli interventi di costruzione di una nuova strada si usano tradizionalmente i conglomerati bituminosi tradizionali con bitume tal quale o bitume modificato.

Le pavimentazioni costruite con conglomerato bituminoso sono le più diffuse e i principali vantaggi rispetto a quelle rigide sono:

-il costo

-la possibilità di accedere ai servizi sotterranei (fogne, rete elettrica, ecc..) evitando operazioni troppo invadenti. Per questi motivi, la ricerca sui bitumi è in continua evoluzione e oggi si può parlare di bitumi modificati (Polymer Modified Bitumens, PMB)

Negli ultimi anni è in atto la tendenza all'utilizzo del "Cold Mix Asphalt" per gli strati di base più profondi e all'uso di conglomerati speciali a bitume modificato sia per gli strati intermedi che per gli strati di usura.

E rifacimento della rete stradale porta al recupero di conglomerato bituminoso noto come "fresato d'asfalto" il cui è un aggregato particolare la cui composizione granulometrica ha più percentuale di fini rispetto alla miscela d'origine (secondo *il nuovo D.M. 69/18*). Tale aggregato è particolare perché contiene anche "bitume invecchiato".

I materiali costituenti sono gli stessi del conglomerato bituminoso vergine. Il fresato proviene dall'azione disgregante della fresa meccanica a freddo sulla pavimentazione d'asfalto ammalorata.

Ogni anno in Italia si producono circa 10 milioni di t di conglomerato bituminoso di recupero. È una cifra notevole che corrisponde a circa un 18% di tutti i cosiddetti rifiuti da C&D (circa 56 Mt).

Un'altra caratteristica importante del "fresato" è che può essere interamente recuperato sia nel conglomerato bituminoso a caldo ma anche nel "freddo", oppure può essere trasformato in un materiale inerte da utilizzarsi in ambito stradale per la realizzazione di rilevati, riempimenti, piazzali e quant'altro. E' quindi un prodotto 100% riciclabile, a differenza di tutti gli altri materiali da costruzione e demolizione.

Il riciclaggio a freddo è quel processo nel quale il conglomerato bituminoso fresato viene utilizzato assieme ad una percentuale di materiali vergini, additivi (generalmente cemento) e da un nuovo legante per costituire un nuovo conglomerato senza usufruire del calore, da cui il termine "Cold" o "a freddo".

L'obiettivo della presente tesi è quello di valutare (e confrontare) le prestazioni di due diversi tipi di emulsioni bituminose tipicamente impiegate nel riciclaggio a freddo, e cioè l'emulsione con bitume tradizionale e l'emulsione modificata con polimeri SBS, tutto questo utilizzando la stessa curva granulometrica e stesso contenuto di filler, cemento ed acqua.

Questi esperimenti di prove sono state effettuate all'interno del Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile (Indirizzo: Via Breccie Bianche 25, Ancona) della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche UNIVPM.



Figura 1

CAPITOLO 2 - STATO DELL'ARTE DEL RICICLAGGIO A FREDDO

2.1 La pavimentazione

Con il termine pavimentazione stradale si indica sinteticamente la sovrastruttura interessata dal moto dei veicoli, atta a garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di comfort e sicurezza.

In tal senso, le caratteristiche più importanti per una struttura stradale possono essere riassunte nei seguenti punti:

- elevata capacità portante;
- buona stabilità;
- bassa permeabilità all'acqua;
- rispetto della plano-altimetria di progetto;
- buone caratteristiche di micro e macro-tessitura;
- vita utile estesa

o spessore ottenuti con miscele differenti,

la stragrande maggioranza della rete viaria urbana ed extra-urbana italiana risulta costituita da pavimentazioni flessibili o semi-rigide.

Le pavimentazioni possono essere:

- Flessibili
- Semi-rigide
- Rigide

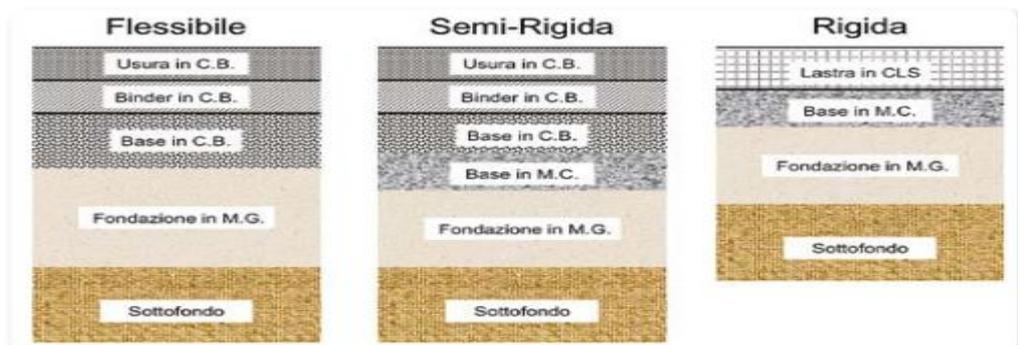


Figura 2.1. Composizione stratigrafica delle possibili tipologie di pavimentazione

Esempi di pavimentazioni rigide sono quelle in calcestruzzo mentre esempi di pavimentazioni flessibili sono quelle in conglomerato bituminoso,

La prima pavimentazione in conglomerato bituminoso fu realizzata a Parigi nel 1858 in Rue Bergère, due anni più tardi, lungo tre lati del Palais Royal si operò in maniera simile. Da allora le sovrastrutture flessibili si sono diffuse in tutto il mondo.

La pavimentazione stradale è costituita da vari strati, ciascuno con caratteristiche proprie, composizionali e funzionali, che spesso possono raggiungere anche la profondità di un metro; i tre elementi principali che la compongono sono: il manto, la struttura ed il sottofondo.

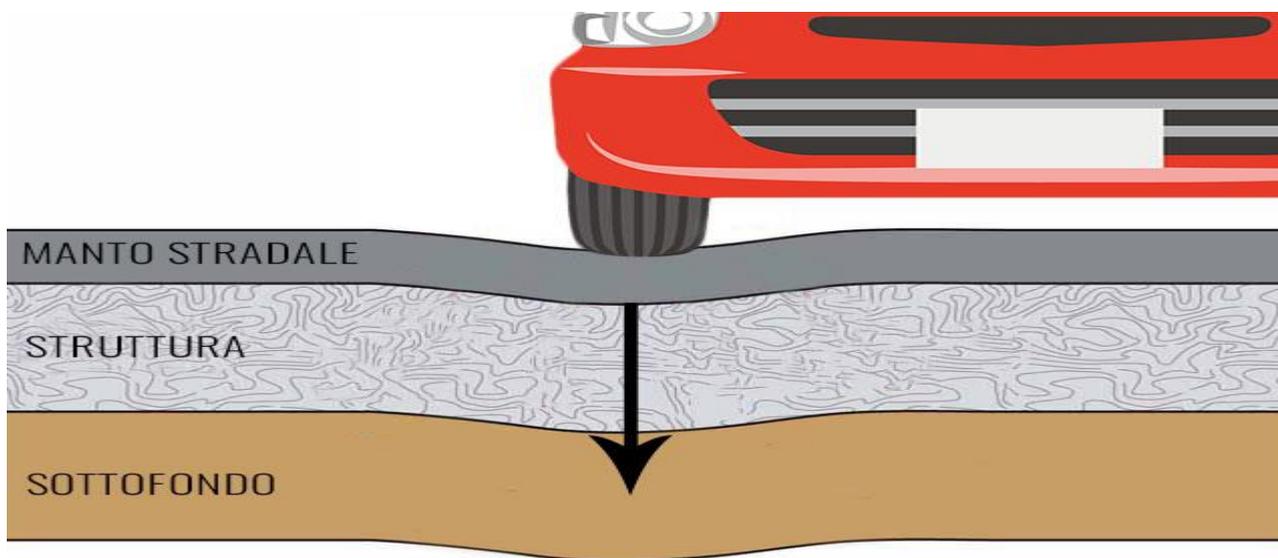


Figura 2.2

Il manto stradale: strato di sostanze granulari distribuito uniformemente sulla superficie delle strade, e in quanto tale rappresenta il primo contatto con il carico; deve perciò essere dotato di buona resistenza e caratteristiche geometriche perfette. Il manto da una protezione a tutta la struttura della pavimentazione, in particolare nei confronti di due elementi: l'elemento traffico e l'elemento ambiente. La protezione dal traffico è relativa sia ai carichi trasmessi dalle ruote, mentre la protezione dall'ambiente, deriva da due principali forme di attacco: gli effetti termici, che conferiscono alla pavimentazione continue contrazioni e dilatazioni, ed il deterioramento provocato dal sole, da cui assorbono quotidianamente raggi ultravioletti che ne accelerano l'invecchiamento; per ovviare a questi tipi di attacco, il manto risultante, dovrà pertanto essere elastico e durevole. Il bitume è certamente uno dei leganti più utilizzati per questo tipo di strato.

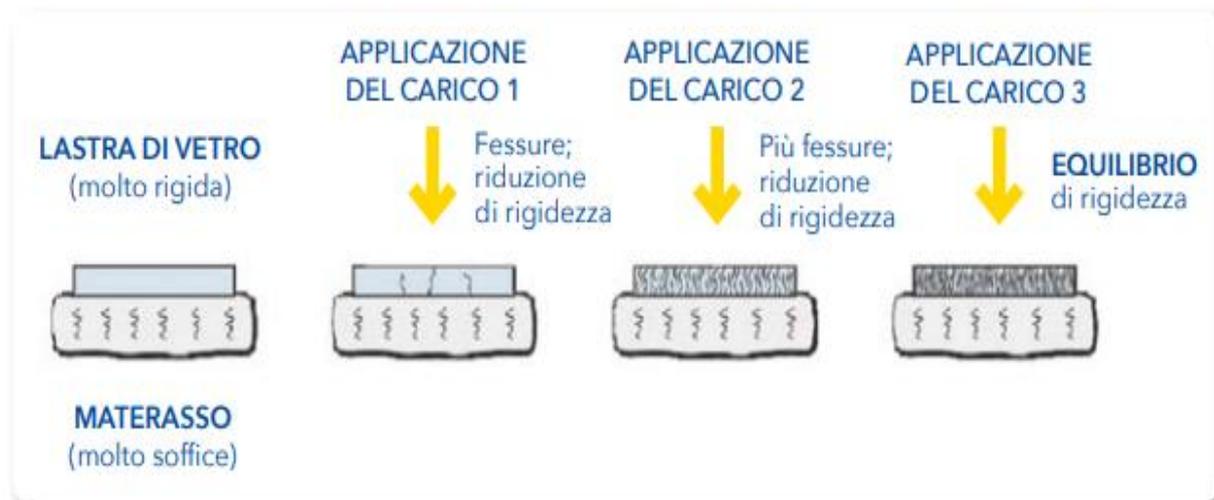


Figura 3

la struttura: permette il trasferimento del carico dal manto al sottofondo. Anch'essa è composta da vari strati, con materiali e caratteristiche di resistenza differenti. Ogni strato ha la funzione di distribuire il carico che riceve dalla parte superiore su un'area più ampia della parte sottostante.

Il sottofondo: Il sottofondo rappresenta lo strato più superficiale del terreno posto al di sotto della sovrastruttura stradale (spessore di riferimento circa pari a 1 metro). Ha il compito di assorbire e distribuire i carichi, evitandone la concentrazione in un unico punto, causa primaria di potenziali cedimenti locali e fessurazioni. La disponibilità di un buon sottofondo costituisce un aspetto strutturale sostanziale per la buona resa della pavimentazione con materiali aventi caratteristiche ottimali. Al fine da evitare un rapido deterioramento della pavimentazione sovrastante e un drastico abbattimento della vita utile.

L'esempio riportato in Figura un sistema bistrato formato da una lastra di vetro sovrapposta a un materasso. Quando il sistema viene sottoposto a carico, la lastra di vetro (nettamente più rigida) assorbendo tutto il carico comincia a manifestare le prime fessure con conseguente diminuzione della rigidità del materiale, mentre il materasso (nettamente meno rigido) non subisce alcuna deformazione. Se si applicano ulteriori carichi, la lastra continuerà a fessurarsi riducendo ulteriormente la propria rigidità ed iniziando a trasferire quota parte del carico al materasso. I due strati si comporteranno come un sistema unico e risponderanno solidamente all'applicazione dei carichi.

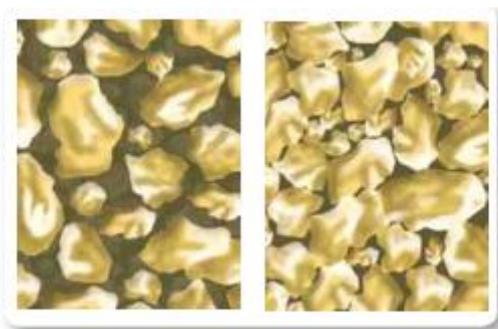


Ciò spiega perché risulta basilare avere una buona portanza del sottofondo, In conclusione qualora il sottofondo presenti scarse caratteristiche meccaniche, seppure la sovrastruttura sovrastante sia ottimale in termini di spessore e proprietà dei materiali costituenti.

TIPOLOGIE DI TERRENO PER SOTTOFONDO:

possono essere divisi semplicemente nelle seguenti categorie:

- roccia;
- terreni non coesivi a granulometria grossolana (e.g. sabbia, ghiaia); (basse ampiezze, tra 0,5 e 1,1 mm.)



- terreni di tipologia mista (e.g. limo sabbioso, argilla ghiaiosa);
- terreni coesivi a granulometria fine (e.g. argilla, limo).

2.2 Il Fresato stradale:

La crisi economica che si sta affrontando in questo periodo ha reso necessario aumentare la redditività dei ridotti budget disponibili da parte dei singoli paesi; Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali ha inizio in Italia all'incirca negli anni '70, grazie alla fresatura degli strati superficiali

Per materiale fresato si intende quello ricavato dalla demolizione di vecchie pavimentazioni arrivate a fine vita utile. Le motivazioni che spingono verso questa direzione sono molteplici:

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

La scelta del tipo di riciclaggio da eseguire dipende generalmente dalle esigenze e dall'intervento da realizzare nonché dalle possibilità economiche; sia il riciclaggio a caldo che quello a freddo possono essere eseguiti sia in impianto fisso che in sito.

In questo capitolo sarà illustrato il tema del riciclaggio a freddo.

2.3 Riciclaggio a freddo

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato riciclato, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a T ambiente.

Il riciclaggio a freddo in impianto fisso può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri.

Negli impianti fissi, nati esplicitamente per questa tipologia di riciclaggio, i dosaggi del RAP, del bitume nuovo e degli aggregati, possono essere effettuati con maggior precisione, ed anche in base alle caratteristiche del fresato, possono essere variate le componenti della miscela; la produttività è di circa 100-150 tonn/ora. La scelta di riciclare a freddo, si effettua soprattutto quando si ha la necessità di utilizzare del materiale fresato, precedentemente accumulato in cantieri o depositi temporanei.

La fresatura a freddo, invece, fornisce un conglomerato di recupero che resta sciolto e lavorabile, quindi, può essere riutilizzato sia nei processi di riciclaggio in sito sia in quelli in centrale. Inoltre, uno dei vantaggi del riciclaggio a freddo, consiste nel non dover ricorrere ad energia termica nei processi di produzione: ciò comporta notevoli vantaggi dal punto di vista economico, energetico ed ambientale. Un altro importante vantaggio che deriva da questo tipo di impianti consiste nella facilità di smobilitazione, che ne permette il posizionamento vicino alla zona di intervento, riducendo i costi ed il dispendio energetico derivanti dai trasporti.

Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto:

1. Discontinuo; Le materie prime da immettere nel ciclo produttivo vengono dosate per singole pezzature e quindi destinate alla miscelazione con il bitume trasportate mediante pale meccaniche, e poi successivamente caricate in apposite tramogge, che alimentano con nastri trasportatori un essiccatore, ovvero un forno a tamburo. La funzione principale dei forni è quella di eliminare l'umidità contenuta negli inerti, in prima fase, e di portarli, in seguito, alla temperatura di miscelazione voluta. Quando gli aggregati caldi (150-160 C) lasciano l'essiccatore, cadono in un elevatore a tazze che li trasporta nella parte più alta della torre di miscelazione contenente il vaglio vibrante, a seguito del quale è collocato il mescolatore. Il bitume viene invece trasportato in stato semisolido da autocisterne, ed è stoccato in serbatoi metallici, coibentati con lana di roccia ad alta densità e rivestiti con un mantello di alluminio, posti in aree ben delimitate; inoltre sono predisposte con lo scarico di fondo, per un eventuale collegamento in serie di più cisterne tra loro. Il bitume viene riscaldato a 130-150 C dalla caldaia oleo termica alimentata con olio combustibile B.T.Z. (olio denso a Basso Tenore di Zolfo) e successivamente mantenuto a temperatura costante

con olio diatermico per omogeneizzarne la composizione. 13 Tramite una pompa volumetrica viene poi inviato e dosato nel mescolatore. Una volta ottenuti le richieste quantità di bitume e aggregati vergini, si passa alla miscelazione vera e propria del materiale: un recipiente ospita un doppio albero a palette controrotanti, che agitano la miscela di pietrisco, bitume e filler per un tempo variabile da 35 a 50 secondi, in base alla potenzialità della macchina e all'umidità residua; i miscelatori sono in genere costituiti da vasche con il fondo apribile per lo scarico del materiale impastato, che mediante un apposito convogliatore, può essere trasportato alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviato ad un silos per lo stoccaggio provvisorio.

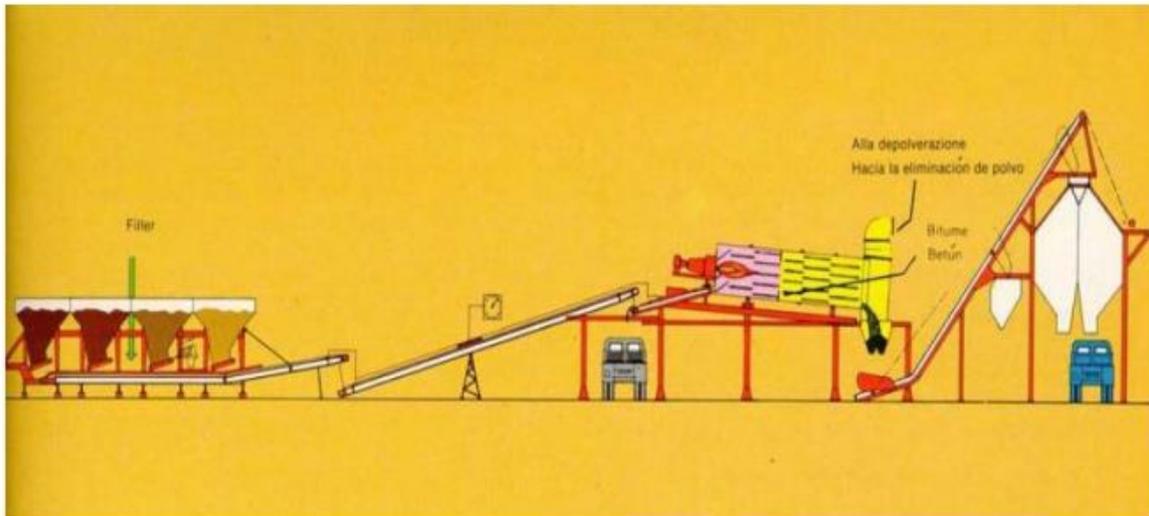
si riesce ad avere un controllo superiore dell'immissione dei fumi, grazie alla presenza di filtri nei camini.



2. continuo:

La differenza fondamentale è rappresentata dalla modalità di dosaggio degli inerti e del legante; nel primo caso il ciclo sarà, per l'appunto, discontinuo, poiché il materiale verrà pesato, e raggiunto un determinato quantitativo, verrà inviato nel ciclo produttivo: la produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso. Nel secondo caso, invece, l'alimentazione dell'impianto avverrà in maniera continua, tramite l'immissione su nastri trasportatori degli inerti, in base a volumi

prestabiliti: in questo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, Tra gli svantaggi abbiamo, però, una qualità del prodotto finito inferiore, a causa dei minori controlli effettuati in fase di produzione, ed inoltre inconvenienti legati all'inquinamento: infatti, la presenza del bitume in prossimità di zone ad elevata temperatura



gli aggregati vergini entrano dal lato del bruciatore e nella parte iniziale del cilindro avviene il loro riscaldamento, mentre nella rimanente parte viene spruzzato il bitume (già reso fluido) ed immesso il filler, in modo da poter consentire il mescolamento del conglomerato.

Il ciclo produttivo si rende necessario un controllo sulla qualità degli inerti, che devono essere stati preventivamente separati, per evitare una possibile miscelazione, con conseguente confusione delle granulometrie.

Nel riciclaggio a freddo le miscele sono composte da:

- materiale di recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o di bitume schiumato;
- filler (additivi);
- acqua di aggiunta, per un miglioramento della lavorabilità;

- aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permetta il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a T ambiente la fresatura quindi viene miscelato con l'emulsione bituminosa o con il bitume schiumato. Il riciclaggio a freddo in impianto fisso può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri.

CAPITOLO 3 MATERIALI

In questo capitolo sono riportati e discussi i risultati e la descrizione dei vari materiali che sono usati dentro le ricette per fare i provini.

3.1 Operazioni eseguite

Lo scopo dell'analisi condotta riguarda lo studio delle caratteristiche meccaniche di diverse miscele preparate con determinate percentuali di emulsione bituminosa (2 tipi).

Nel laboratorio di strade (UNIVPM) abbiamo fatto vari esperimenti miscelando le materie seguendo delle ricette per fare prove sui provini di conglomerato riciclato a freddo con 2 diversi tipi di emulsione ma con la stessa curva granulometrica. Lo scopo è il confronto dei due diversi tipi di emulsione (tradizionale e modificata) all'interno del conglomerato a freddo, confrontando le caratteristiche dello stesso in termini di rigidità e rottura al variare della maturazione (3, 7, 14, 30 gg). Inoltre le due diverse tipologie di emulsione sono state confrontate in termini di sensibilità all'acqua).

3.2 Materiali

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso sono stati:

-emulsione bituminosa (normale N e modificata P)

-sabbia

-fresato

-fresato 0-1

-cemento

-filler calcareo

-acqua

3.2.1- Sabbia

La sabbia è un aggregato di granuli non cementati, derivata dalla disgregazione di rocce; La sabbia è costituita da piccoli frammenti di minerali e rocce di dimensioni comprese tra 0,5 mm e 2mm particelle più piccole della sabbia rientrano nella categoria del limo o dell'argilla.

La sabbia si forma da principi meccanismi:

- Erosione di rocce preesistenti
- l'accumulo di resti organici quali scheletri e gusci di molluschi.

Questo è il motivo per il quale non esiste un'unica tipologia di sabbia.

La sabbia utilizzata per la realizzazione di questa indagine sperimentale è calcarea con pezzatura 0/6

caratterizzata da un colore biancastro.

Campione: d [mm]	Sabbia Calcareo % passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	92,5
2	60,4
1	41,5
0,5	22,5
0,25	16,0
0,125	11,8
0,063	9,2
FONDO	0



3.2.2 Fresato

Il fresato deriva da opere di frantumazione di strati ammalorati di vecchie pavimentazioni giunte al termine della loro vita utile e che necessitano di interventi di manutenzione..In questo caso, al fine di ottimizzare la miscela di aggregati ed avvicinare la curva granulometrica del fresato a quella di Fuller ($D_{max} = 20 \text{ mm}$), è stata aggiunta la parte fina del fresato stesso (0-1 mm). Ciò allo scopo di controllare maggiormente l'estrema variabilità del materiale fresato

L'uso del fresato non comporta sostanziali cambiamenti, ma devono essere eseguite le seguenti implementazioni:

- integrazione del Sistema Qualità;
- utilizzo di un impianto di produzione dotato di sistemi meccanici per l'integrazione del fresato;
- verifica delle caratteristiche secondo metodi prestazionali.

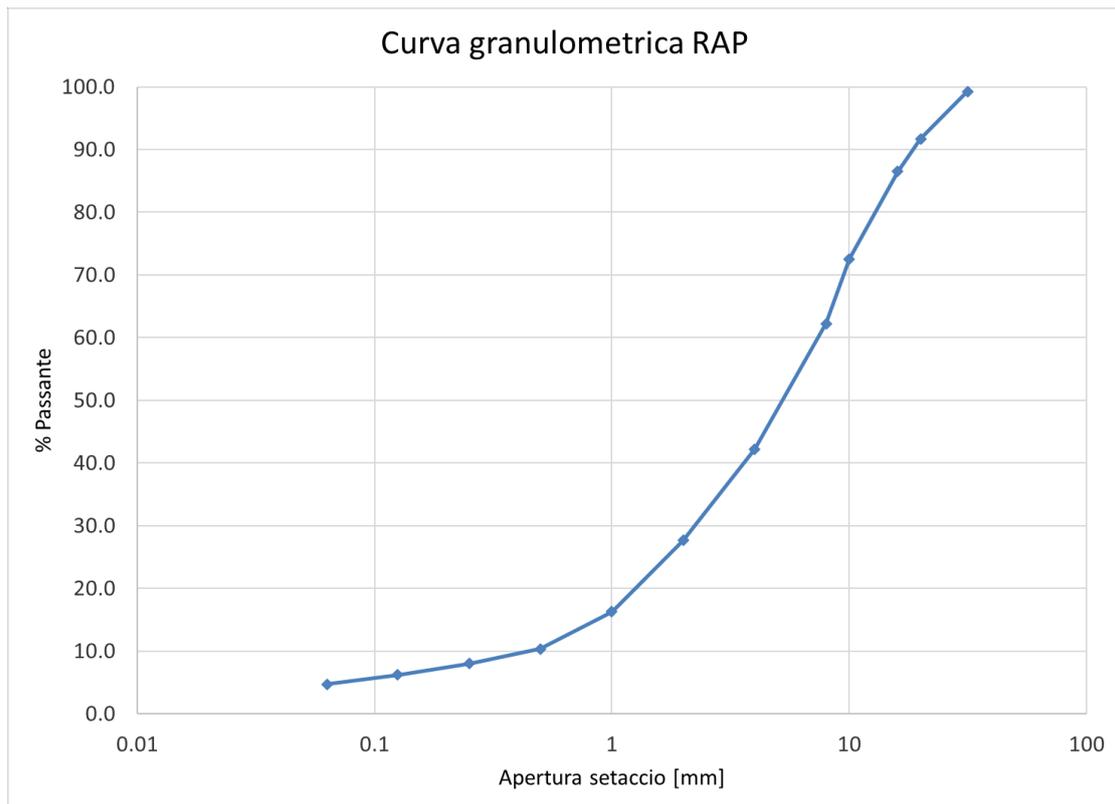
Campione:	Fresato
d [mm]	% passante
31,5	99,2
20	91,7
16	86,5
10	72,5
8	62,2
4	42,2
2	27,6
1	16,3
0,5	10,4
0,25	8,0
0,125	6,2
0,063	4,7
FONDO	0



Fresato tal quale



Fresato 0-1 mm



3.2.3 Cemento

il cemento è una varietà di materiali da costruzione. Ne esistono molte tipologie che in base alle caratteristiche vengono poi impiegato nella realizzazione di opere murarie diverse: case, strade, ponti, ecc...

Classificazione del Cemento:

- ordinario - I
- modificato - II
- a rapido indurimento - III
- a basso calore di idratazione IV
- resistente ai solfati - V

Le materie prime per il cemento sono sostanze contenenti carbonato di calcio (calcare o gesso) e silicati di alluminio (argilla) polverizzate e cotte in un forno a 1300-1500 gradi



3.2.4 filler calcareo

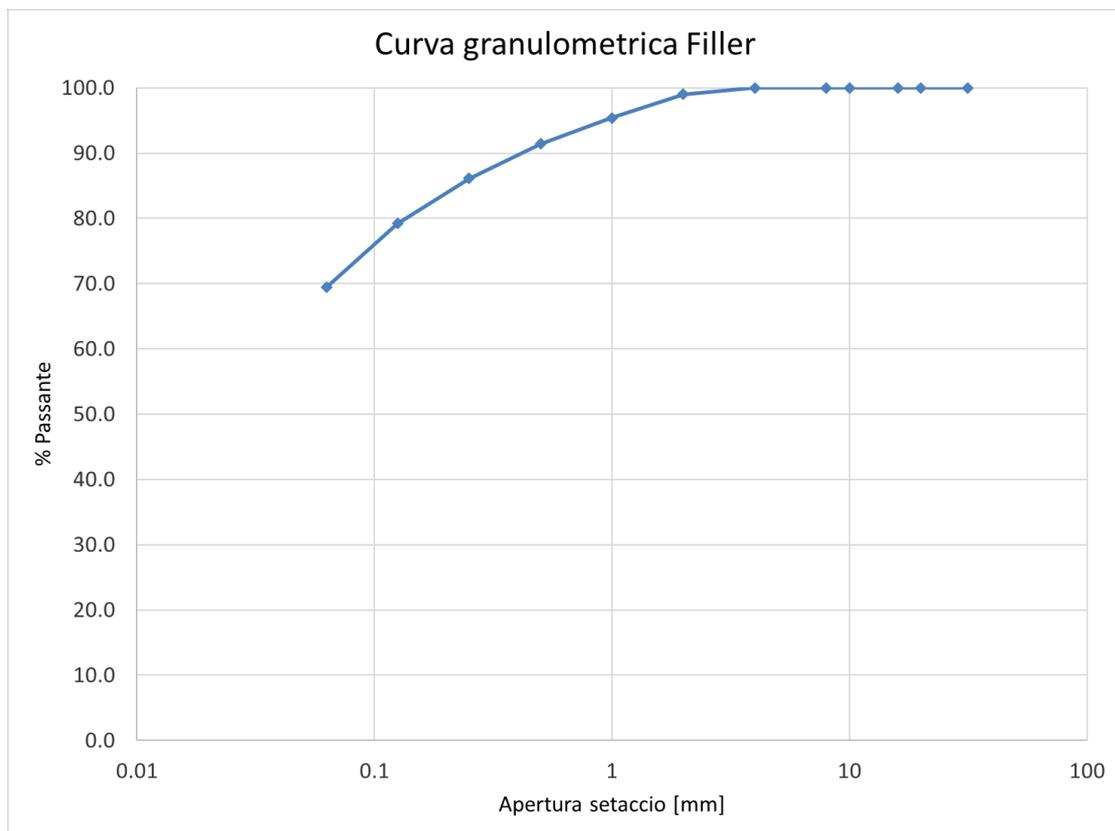
Il filler calcareo è un prodotto minerale che può essere aggiunto all'impasto di calcestruzzo nel corso del suo confezionamento, oppure al clinker al momento della produzione del cemento in fabbrica. Un tipo di filler calcareo dalla granulometria ridotta destinato alle miscele bituminose; un tipo di filler calcareo destinato al calcestruzzo, che consente di generare miglioramenti reologici evitando di compromettere le resistenze meccaniche.

Il filler è una frazione di aggregato passante al setaccio 0,063 mm, che può essere aggiunto ai materiali da costruzione per conferirne diverse proprietà. La stessa norma definisce anche il termine di polveri, (fini), come classe granulometrica di un aggregato che passa allo staccio medesimo, cioè 0,063 mm.



Campione:	Filler di recupero
d [mm]	% passante

31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	99,0
1	95,4
0,5	91,4
0,25	86,1
0,125	79,2
0,063	69,5
FONDO	0



3.2.5 Acqua

L'acqua deve essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica, frazioni limo-argillose e qualsiasi altra sostanza nociva.

3.2.6 emulsione

L'emulsione è composta da due liquidi mescolabili, uno disperdente (l'acqua) e l'altro disperso (il bitume) sottoforma di goccioline. 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). La rottura dell'emulsione bituminosa avviene in tre fasi:

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

La velocità di rottura dipende da:

- Temperatura ambientale
- Temperatura dell'emulsione
- Dimensione delle particelle di bitume disperse
- Dimensione e natura degli inerti
- Modalità di miscelazione e compattazione (*Ravaioli, 2004, [16]*)

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

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

Nel bitume schiumato invece si unisce acqua con bitume caldo (a 180°C) e si genera una reazione di espansione per la formazione di bolle di vapore rivestite da bitume.

Nei nostri provini abbiamo usato sia l'emulsione tradizionale e sia l'emulsione modificata con polimeri.

Il bitume tradizionale impiegato per la produzione di E.B. è classificabile, secondo le specifiche tecniche contenute nella norma specifiche tecniche contenute nella norma UNI EN 12591 in diverse gradazioni in funzione EN 12591, in diverse gradazioni in funzione della prova di penetrazione. Questo tipo di emulsione si ricava dal bitume distillato e viene utilizzata solitamente per la realizzazione di misti granulari legati a calce e cemento.

Sito produttivo	Stabilimento di Bologna Stabilimento di Perugia	Via del Tragheto, 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

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

Si distinguono due tipologie di emulsioni modificate:

-emulsioni modificate monofase: caratterizzate da un'unica fase dispersa di goccioline di bitume modificato; In questo caso l'emulsione si ricava a partire da un bitume modificato elastomerizzato (polimeri SBS, SB) oppure plastomerizzato (polimeri EVA).

-emulsioni modificate bifase: caratterizzate da una fase dispersa costituita da due tipi di goccioline costituite rispettivamente da bitume e da lattice di gomma naturale o sintetico.

Sito produttivo	Stabilimento di Bologna	Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna
Designazione	C60BP10	
Descrizione del prodotto	Polymer Modified Bitumen in emulsione acquosa per conglomerati bituminosi riciclati a freddo prodotti in impianto.	

Caratteristiche dell'emulsione	Metodo	U.d.M.	Prestazione		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)

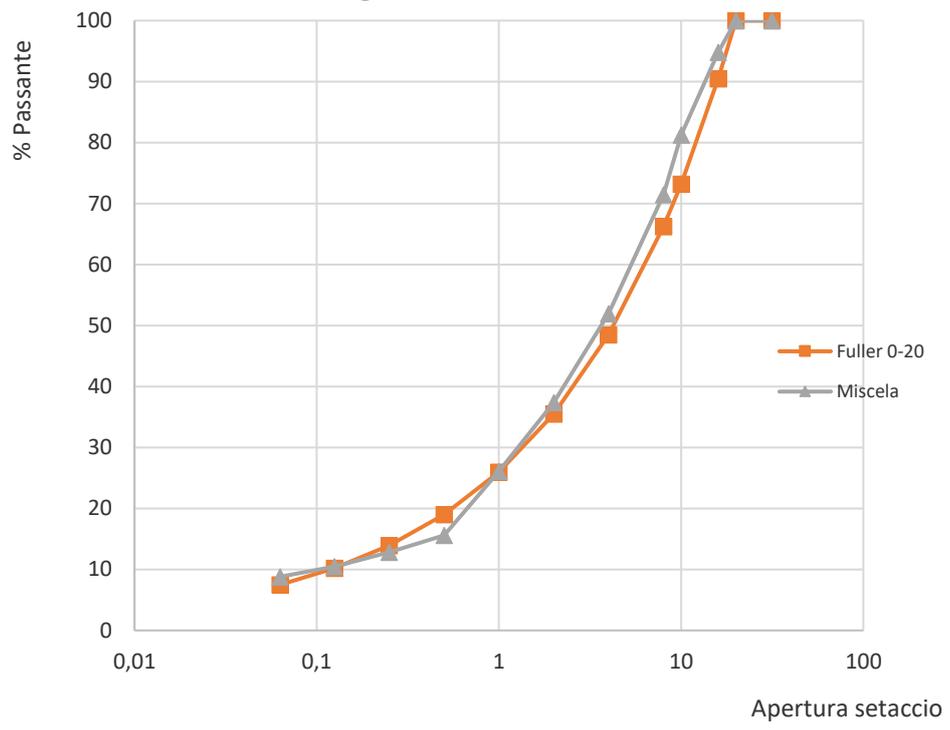
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		70	3
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammolimento P.A.	UNI EN 1427	°C	65		2
Coesione Force ductility test a 10°C	UNI EN 13589 UNI EN 13703	J/cm ²	2		6
Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C	UNI EN 13398	%	75		4



	MEDIA	Fuller 0-20	Fino_0-1	Filler	Sabbia	Cemento	MIX fase 5	Errore
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	% passante	%
31.5	100.0	100.0	100.0	100	100	100	100.0	0.0
20	100.0	100.0	100.0	100	100	100	100.0	0.0
16	94.2	90.4	100.0	100	100	100	94.7	4.3
10	79.2	73.2	100.0	100	100	100	81.0	7.8
8	68.3	66.2	100.0	100	100	100	71.1	4.9
4	46.6	48.5	100.0	100	92.5	100	51.2	2.7
2	30.5	35.5	100.0	100	60.4	100	35.7	0.2
1	18.0	26.0	100.0	100	41.5	100	23.9	2.1
0.5	11.6	19.0	64.2	100	22.5	100	16.7	2.3
0.25	9.0	13.9	49.7	98.6	16	100	13.8	0.1
0.125	6.9	10.2	37.8	90.2	11.8	100	11.3	1.1
0.063	5.4	7.5	29.6	77.6	9.2	100	9.4	1.9
FONDO	0	0	0	0	0	0	0	0
% frazione	0.91		0.025	0.02	0.025	0.02	1.00	27.5

Queste percentuali di aggregati sono state miscelate per ottenere una curva granulometrica finale (compresa di fino, filler e cemento, oltre che di fresato) che fosse il più vicino possibile alla curva di Fuller (vedi fig. sotto)

Curva granulometrica miscela



CAPITOLO 4 - PROGRAMMA SPERIMENTALE

4.1 Preparazione miscela

Dopo aver pesato le quantità delle varie pezzature di aggregati usando un'apposita bilancia di precisione si dispone il materiale nelle teglie e si riscalda nel forno alla temperatura di 60 gradi per 1 ora in modo da eliminare l'umidità. Dopo aver ottenuto gli aggregati asciutti si passa alla preparazione del materiale all'interno dei secchi di plastica. Dopo aver versato la miscela di aggregati si aggiunge l'acqua di assorbimento.

Quindi si miscela manualmente e poi si sigilla il secchio con un telo di plastica per evitare perdita di acqua

Il giorno dopo si procede con la seconda fase si passa alla miscelazione che prevede la seguente procedura:

-si versano aggregati e filler nel miscelatore e si miscelano per 1 minuto





- si versa metà del cemento e si miscela per 1 minuto



-Viene versata anche la seconda metà del cemento e si ripete sia la miscelazione meccanica che manuale;

-si mette metà dell'acqua e viene ripetuta sia la miscelazione meccanica che quella manuale;



- A questo punto si aggiunge l'emulsione bituminosa facendo un piccolo fosso nel materiale e una volta versata l'emulsione, ricoprirla con un po' di materiale prima di azionare il miscelatore per 1 minuto.





-Infine, si aggiunge la restante parte di acqua e si mescola per un minuto manualmente e dopo con il miscelatore.



4.2 Realizzazione provini

Dopo aver preparato la miscela, si passa alla preparazione dei provini, tramite la pressa a taglio giratoria.

La pressa a taglio giratoria consente di ottenere dei provini in conglomerato compattato che sono in grado di ben simulare le proprietà fisico-meccaniche di carote di pavimentazioni realizzate con la stessa miscela e prelevate in opera.

Tale evoluzione è dovuta alla rotazione della fustella da 150 mm di diametro, al cui interno è inserito il conglomerato, e alla non coincidenza degli assi lungo cui agiscono le risultanti delle pressioni durante la compattazione. La pressa giratoria a taglio realizza la compattazione della miscela attraverso l'applicazione contemporanea di una pressione assiale costante e di una rotazione, secondo un angolo di inclinazione di $1,25^\circ$. Una delle caratteristiche della compattazione tramite questa apparecchiatura è la possibilità di verificare ed analizzare come avviene l'addensamento dei provini di conglomerato al variare del numero di giri.

Si apre l'aria compressa e si verifica che sia al di sopra di 700 kPa in quanto la norma stabilisce che la compattazione deve avvenire a una pressione di 600 kPa. Si accende il computer e si avvia il software, [Fig. 4], impostando sulla schermata principale, [Fig. 5], i dati del provino, ovvero il nome, il numero del provino, la densità massima, il diametro del provino e il numero di rivoluzioni che il macchinario deve compiere. Una fase importante è quella della lubrificazione del piano d'appoggio con il grasso perché si creano attriti che non rovinano la macchina e che non permettono a compattazione al meglio del provino. Il grasso va applicato sulla fustella, sugli snodi, sul pistone e sul piano d'appoggio; dopo questa fase ha inizio la prova. Il pistone scende finché non raggiunge il livello desiderato di pressione. Dopo questa fase di assestamento, i supporti laterali si sollevano determinando un'inclinazione della fustella, che, di conseguenza, inizierà a ruotare.



Figura 4



Figura 5



Il processo di compattazione prevede inoltre che, mentre la fustella ruota attorno al proprio asse ad una velocità prestabilita, il pistone imprime sulla miscela una pressione costante con un'applicazione in direzione inclinata rispetto all'asse della fustella. Raggiunta la massima compattazione del provino, ovvero raggiunto il numero di giri impostati prima di avviare la prova, il pistone risale, quindi è possibile estrarre la fustella dove al suo interno c'è il provino compattato, la massa della fustella verrà annotata prima di inserire il materiale all'interno, dopo aver inserito il materiale e dopo la compattazione. La prova si conclude con l'estrazione del provino, dopo aver incastonato la fustella all'estrattore rigido, mediante martinetto idraulico che lo solleva dal basso verso l'alto provocandone la fuoriuscita, Altre prove che sono fatte su questi provini e la determinazione delle proprietà volumetrica.

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

Si definisce massa volumica massima la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima 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:

$$\rho_m = 100 / ((p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)) \text{ dove:}$$

- ρ_m : massa volumica massima della miscela in kg/m³;
- p_a : percentuale di aggregati nella miscela in m/m;
- ρ_a : massa volumica apparente degli aggregati in kg/m³;
- p_b : percentuale di legante nella miscela in m/m;
- ρ_b : massa volumica del legante a 25 °C in kg/m³.

4.4 Determinazione della massa volumetrica apparente (UNI EN 12697-6)

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

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

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

dove:

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

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

$$Vm = ((\rho m - \rho b) / \rho m) \cdot 100$$

4.5 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)

Nel capitolo seguente viene illustrato lo studio del modulo di rigidezza a trazione indiretta tramite l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester). Tale apparecchiatura consente di applicare un carico di compressione in una direzione e di misurare la deformazione tramite trasduttori nella direzione ruotata di 90° rispetto a quella di applicazione del carico. La determinazione del modulo di rigidezza con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di 90°±2°). Il macchinario è collegato ad un computer e attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova. Tramite un sistema di gestione verrà effettuata una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Gli impulsi di condizionamento servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione. Nella prova di trazione indiretta ripetuta, il modulo del campione è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del

coefficiente di Poisson. Analizzando lo stato di sollecitazione si possono definire, in corrispondenza del diametro orizzontale, le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) ed y (compressione) date dalle seguenti espressioni: $\sigma_{x,max} = 2 \cdot P / \pi \cdot d \cdot t$

$$\sigma_{x,media} = 0,273 \cdot P / d \cdot t$$

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

$$\sigma_{y,media} = -P / d \cdot t$$

In cui P è il carico applicato, d è il diametro del campione e t è lo spessore del campione. Si può, inoltre, determinare il modulo di rigidezza elastica in funzione di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni che può essere rappresentato in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale ϵ_x dell'elemento è:

$$\epsilon_{x,media} = (\sigma_{x,media} / E) - ((\nu) \cdot (\sigma_{y,media} / E))$$

Dove ν è il coefficiente di Poisson e E è il modulo elastico del materiale. La deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

$$\Delta = ((0,273 \cdot P) / (E \cdot t)) + ((\nu) \cdot (P / E \cdot t))$$

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

$E = (P / \Delta \cdot t) \cdot (0,273 + \nu)$ La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a $0,60 \pm 0,10$, viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione: $E' = E[1 - 0,322(\log(E) - 1,82)(0,60 - k)]$ Dove E' è il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa, k è il rapporto tra le aree e E è il modulo di rigidezza in MPa. Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $5,0 \pm 0,2$ μm . Il modulo è influenzato dalle seguenti variabili:

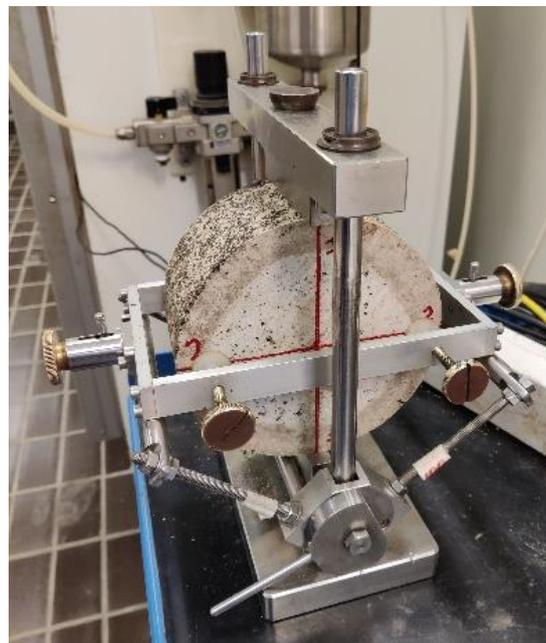
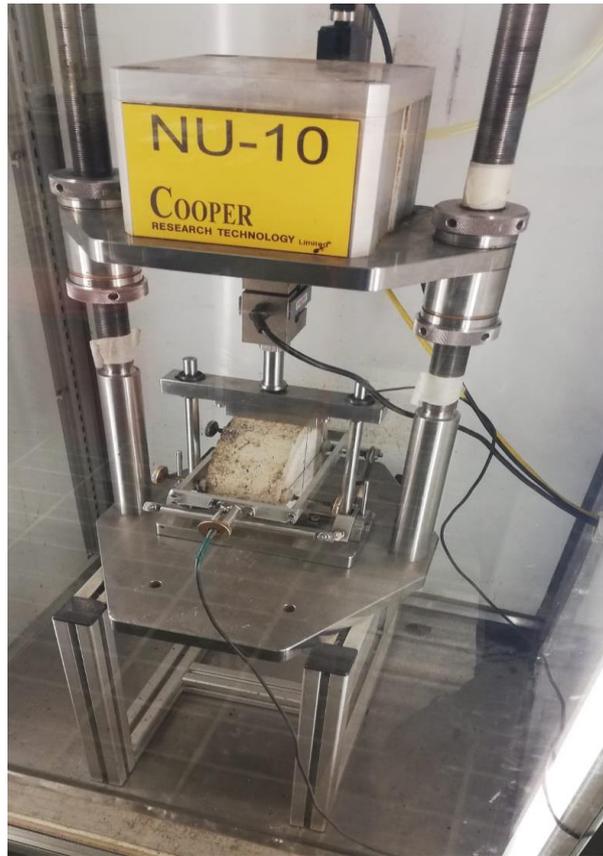
♣ temperatura: affinché sia valida la formula per il calcolo del modulo E, occorre che quest'ultimo risulti uguale sia a compressione che a trazione. Questa affermazione può essere considerata vera solo per

temperature sotto i 25°C. In questo studio le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di 20°C;

♣ rise-time (tempo di picco): a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In particolare il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo. Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidezza del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale). La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente: $f = 1000 / 4 \cdot t_r$

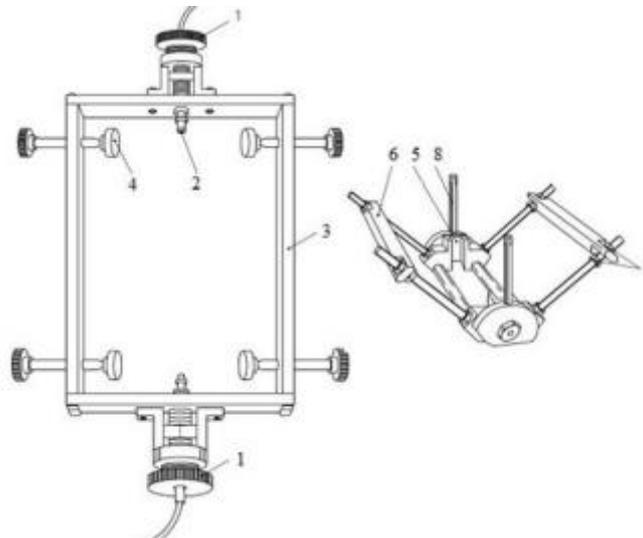
♣ deformazione orizzontale imposta: a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 2µm;

♣ numero di colpi di condizionamento iniziale: tali impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione; è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente. Pertanto nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento. Il macchinario è composto da vari elementi ed è posto all'interno di una camera climatica che permette il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di prova, nel caso in esame 20°C. La temperatura all'interno della camera viene misurata tramite un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina. L'elemento fondamentale è la cella di carico la quale è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati. La cella di carico supporta un carico massimo pari a 20 kN a cui subito sotto è collegato il pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino

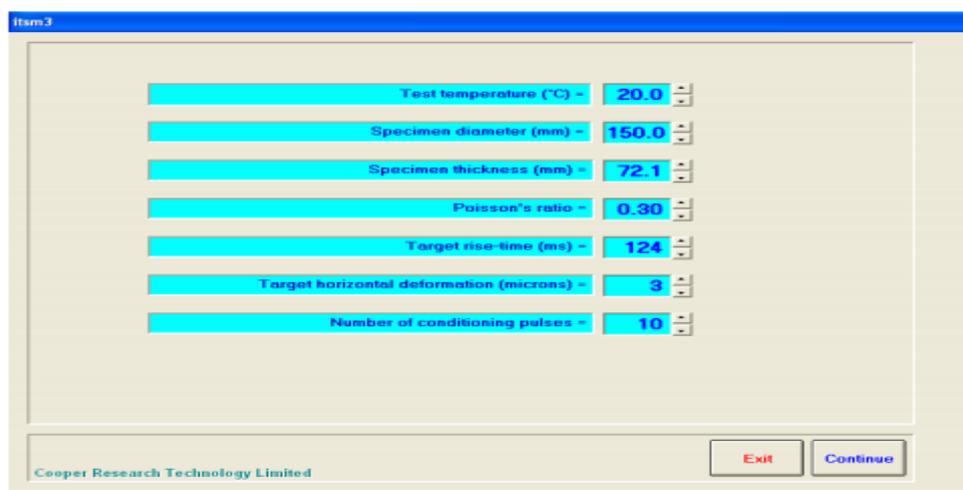


Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta si utilizzano due strumenti illustrati in figura 2.42. In tale illustrazione si possono notare i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori (1), il telaio al 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).



Prima di iniziare la procedura atta alla realizzazione del test, le altezze dei provini sono state misurate tramite calibro con una precisione non inferiore a 0,1 mm, in quanto l'altezza finale derivante dal compattatore giratorio risulta essere imprecisa. 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. Si illustra ora in dettaglio come è stata effettuata la misurazione del modulo a trazione indiretta. Innanzitutto è stato usato un software grazie al quale è possibile il controllo di tutte le fasi della prova. La schermata iniziale del software è quella indicata in figura



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

Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;

♣ Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;

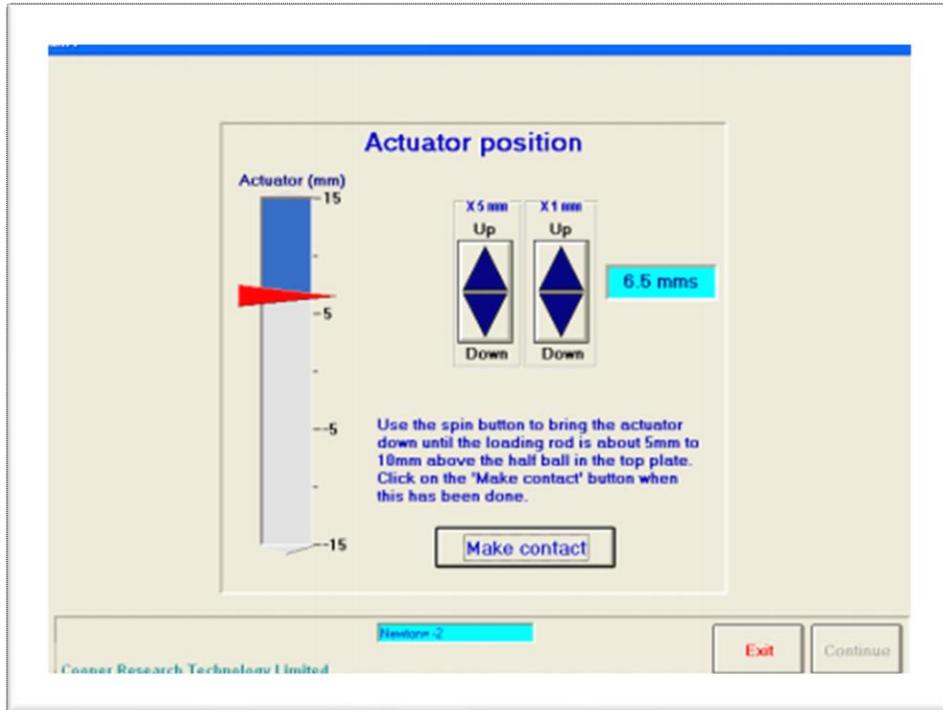
♣ Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;

♣ Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,30;

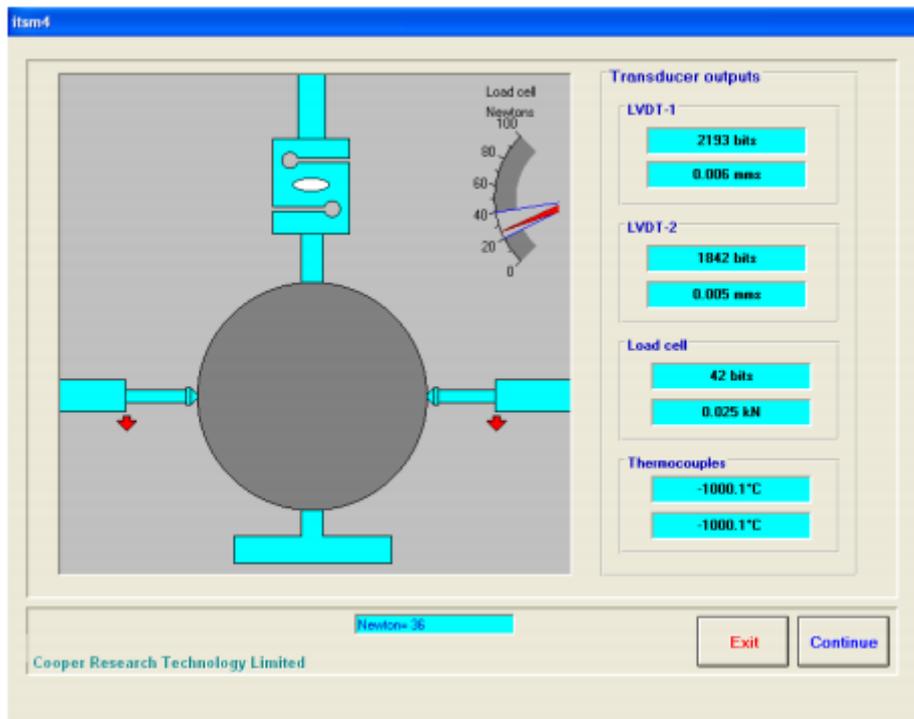
♣ Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata;58

♣ Target horizontal Deformation [μm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;

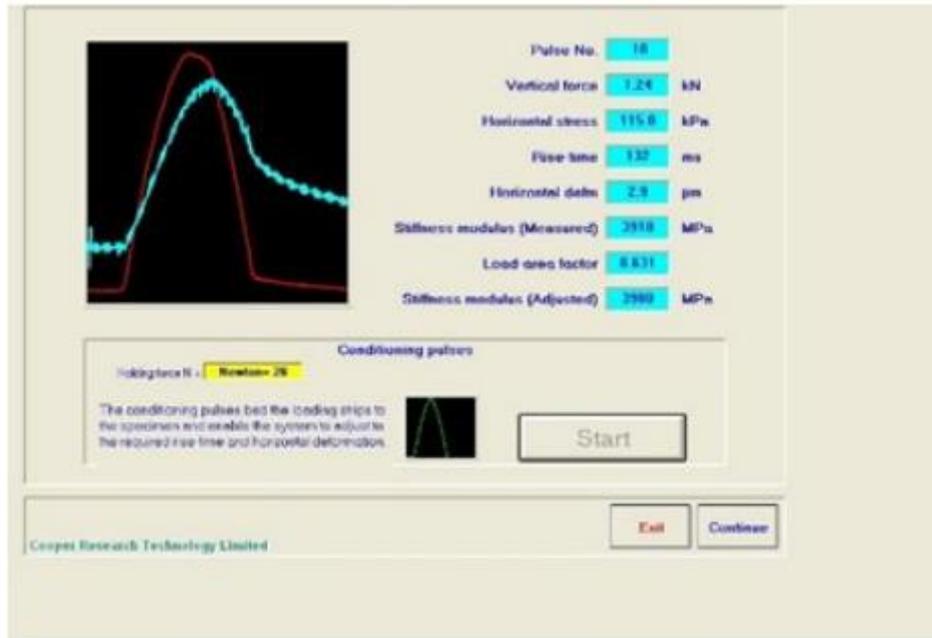
♣ Number of Conditioning Pulses : numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 2 μm . Nella finestra più piccola in alto a destra va invece inserita la denominazione del provino, cioè il nome di riferimento che comparirà nel rapporto finale. Dopo aver inserito i dati appena elencati cliccando su Continue si passa alla schermata successiva, figura 2.44. Essa è utile al controllo del pistone pneumatico; infatti una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico. Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante Make Contact.



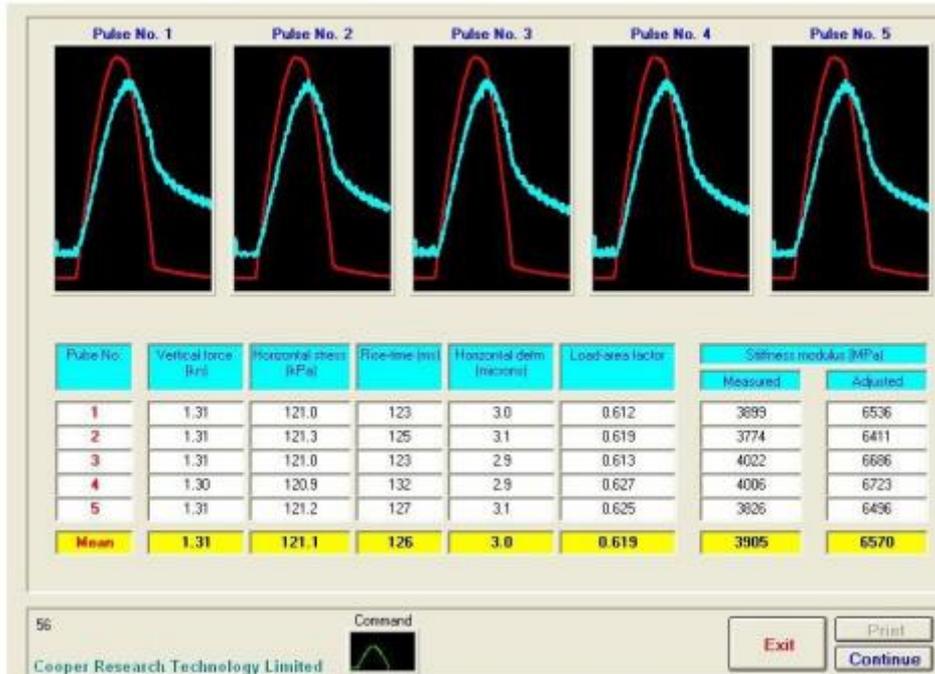
La schermata successiva è utile al controllo dei trasduttori; i trasduttori per misurare correttamente la deformazione vanno regolati finché le due frecce diventano rosse come in Figura



vengono visualizzati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di precarico.



i clicca su Start Test per eseguire la prove e al termine vengono visualizzati i 5 impulsi e i relativi risultati, 8. Ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro.



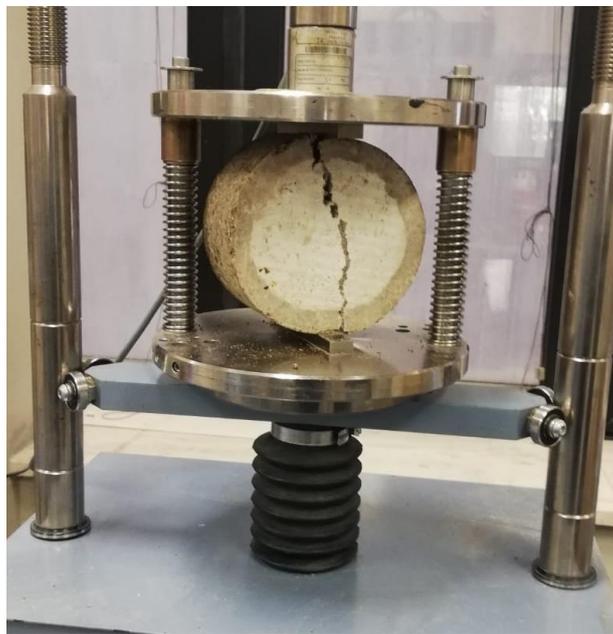
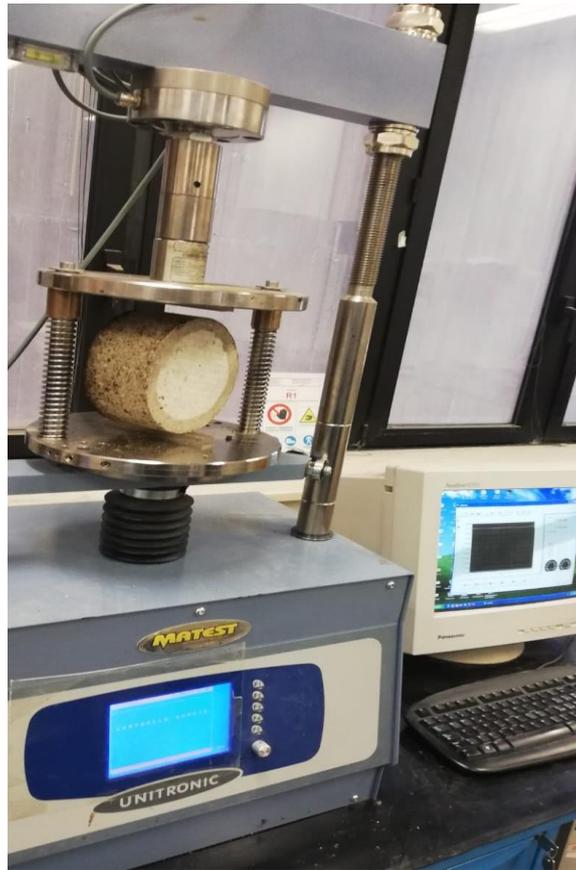
Dopo aver preso nota dei risultati ottenuti, il provino viene tolto da dentro al macchinario e viene smontato il castelletto, per ripetere il test sul secondo diametro. Il software ripeterà tutti i passaggi sopra elencati per il primo diametro anche per il secondo. Una volta ottenuti i risultati relativi anche al secondo diametro si

effettua un confronto. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%.

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

Prima dell'esecuzione della prova, i provini di conglomerato vengono condizionati all'interno di una camera climatica alla temperatura di prova prevista dalla norma, pari a 25 °C. Tale prova consiste nella rottura del provino tramite compressione, fino ad arrivare alla rottura, la quale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico.

L'esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti, la testa di carico superiore. Una volta sistemato il provino in maniera corretta, la prova può proseguire tramite un pannello di controllo oppure in remoto con un computer tramite il software UTM II. Nel controllo in remoto, si impostano parametri di prova si ottengono in output oltre alla curva carico-corsa, tutti i punti che formano tale curva, il carico di rottura a compressione e la deformazione a compressione. I principali parametri di prova sono il diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova. Durante la prova, la testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subito dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione. La prova termina quando avviene la rottura del provino, [Fig. 2.50], successivamente si chiede al software di calcolare e archiviare i dati; nelle figure seguenti si possono vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II.



Dopo aver analizzato i risultati ottenuti dalla prova si passa al calcolo della Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, a partire dal carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

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

dove P_{max} è il carico massimo in N, t e d : altezza e diametro del provino in mm.

Al termine della prova, è stato possibile determinare la sensibilità all'acqua calcolando il coefficiente ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) come rapporto percentuale fra la resistenza a trazione indiretta in condizioni bagnate e quella in condizioni asciutte:

$$\text{ITSr} = (\text{ITS wet} / \text{ITS dry}) * 100$$

dove: ITSw = resistenza a trazione indiretta media dei provini bagnati;

ITSd = resistenza a trazione indiretta media dei provini asciutti.

CAPITOLO 5 - RISULTATI

Nel seguente capitolo verranno illustrati i risultati sperimentali ottenuti per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche dei provini testati. Inoltre, verrà effettuato un confronto tra i provini confezionati a tempi differenti e tra miscele ottenute con diversi tipi di emulsione.

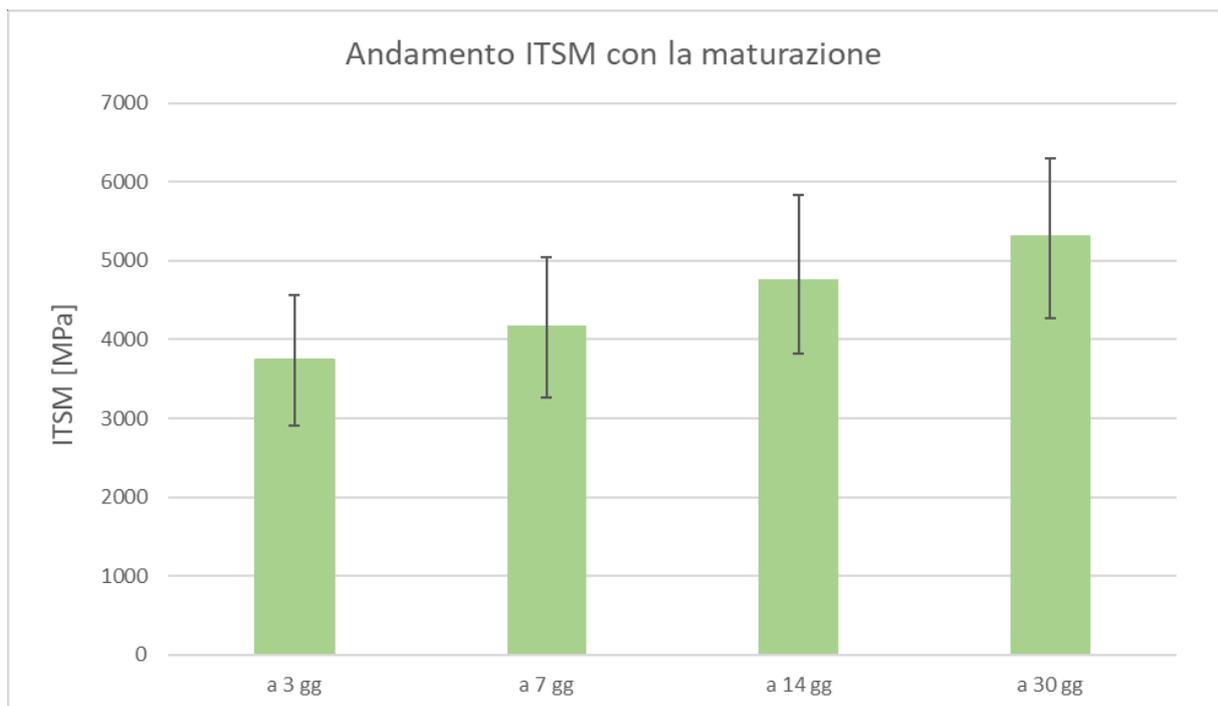
Tali risultati saranno esplicitati nei paragrafi successivi tramite apposite tabelle e grafici in modo da renderne più semplice la comprensione.

5.1 Miscela con emulsione normale:

Codice	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h _m [mm]	D [mm]
AN_1	70,7	70,8	71,2	71,2	71,0	150
AN_2	70,3	70,1	70,3	70,5	70,3	150
AN_3	70,5	71	71	70,3	70,7	150
AN_4	70,7	70,8	71,4	70,7	70,9	150
AN_5	71,5	70,7	71	70,7	71,0	150
AN_6	71,4	70,9	71	71,3	71,2	150
AN_7	70,6	71	71,3	71,1	71,0	150
AN_8	71	71,4	71,2	71	71,2	150
BN_9	70,6	70,8	70,6	70,3	70,6	150
BN_10	70,7	70,6	70,4	70,6	70,6	150
BN_11	71,9	71,9	72,5	72,3	72,2	150
BN_12	70,6	70,5	70,6	70,6	70,6	150
BN_13	71	70,6	70,6	70,4	70,7	150
BN_14	70,6	71,1	71,1	70,9	70,9	150
BN_15	70,7	70,5	70,6	70,9	70,7	150
BN_16	71	71,2	71,2	71	71,1	150
EN_17	70,1	70,3	69,9	70	70,1	150
EN_18	70,3	70,1	70,6	70,5	70,4	150
EN_19	72,7	72,8	72,9	72,9	72,8	150
EN_20	71,2	71,1	71,2	71,2	71,2	150
GN_27	70	70,3	70,7	70,6	70,4	150
GN_28	70,7	70,2	70,6	70,3	70,5	150

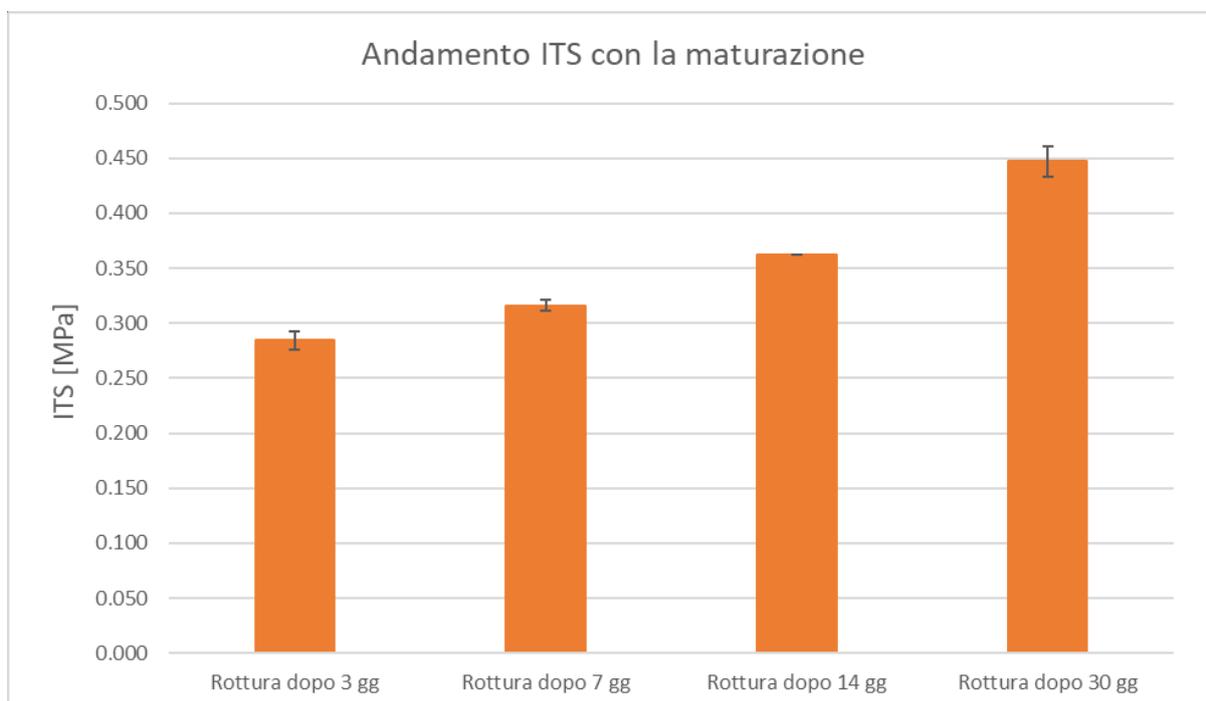
Prova di modulo:

Codice	ITSM											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AN_1	3934	3822	3878	4304	4231	4268	5039	4831	4935	5669	5441	5555
AN_3	2895	2921	2908	3326	3212	3269	3882	3743	3813	4206	4344	4275
AN_5	2839	2701	2770	3151	3068	3110	3728	3716	3722	3904	3871	3888
AN_7	3119	3052	3086	3449	3520	3485	4146	4212	4179	4625	4588	4607
BN_9	3888	3878	3883	4410	4265	4338	4912	4872	4892	5549	5580	5565
BN_11	4615	4507	4561	5090	4992	5041	5846	5824	5835	6396	6212	6304
BN_13	3600	3720	3660	3994	4285	4140	4591	4648	4620	5118	5150	5134
BN_15	3737	3769	3753	4372	4191	4282	4839	4889	4864	5665	5264	5465
EN_17	5040	4884	4962	5653	5285	5469	6274	6107	6191	7206	7027	7117
EN_19	4805	4821	4813	5450	5208	5329	6025	5801	5913	7074	6806	6940
GN_27	4131	4068	4100	4573	4436	4505	5121	5002	5062	5736	5507	5622
GN_28	3820	3777	3799	4289	4301	4295	4801	4517	4659	5426	5308	5367
		media	3736		media	4180		media	4762		media	5321



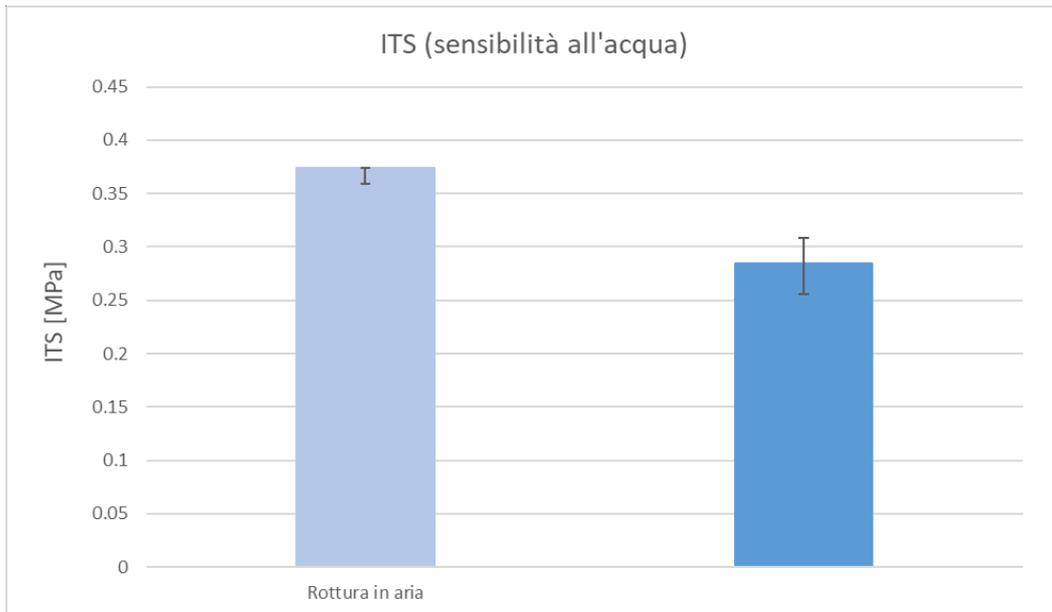
Rottura:

Codice	ITS											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
AN_2	0.0270	4.575	0.276	-	-	-						
AN_4	-	-	-	0.0140	5.204	0.311						
AN_6	-	-	-	-	-	-	0.01341	6.0699	0.362			
AN_8	-	-	-	-	-	-				0.01633	7.7325	0.461
BN_10	-	-	-	-	-	-				0.0167	7.2036	0.433
BN_12	-	-	-	-	-	-	0.01379	8.2705	0.497			
BN_14	-	-	-	0.0150	5.359	0.321						
BN_16	0.0159	4.903	0.293	-	-	-						
		media	0.285		media	0.316		media	0.362		media	0.447



La sensibilità d'acqua:

Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
CN_21	0.03455	6.3739	0.383	-	-	-	0.76
CN_22	0.014266	6.13374	0.368	-	-	-	
CN_23	0.016018	6.18237	0.371	-	-	-	
DN_24	-	-	-	0.012693	5.218845	0.308	
DN_25	-	-	-	0.014669	4.24012	0.256	
DN_26	-	-	-	0.017674	4.793314	0.290	
		media	0.374		media	0.285	

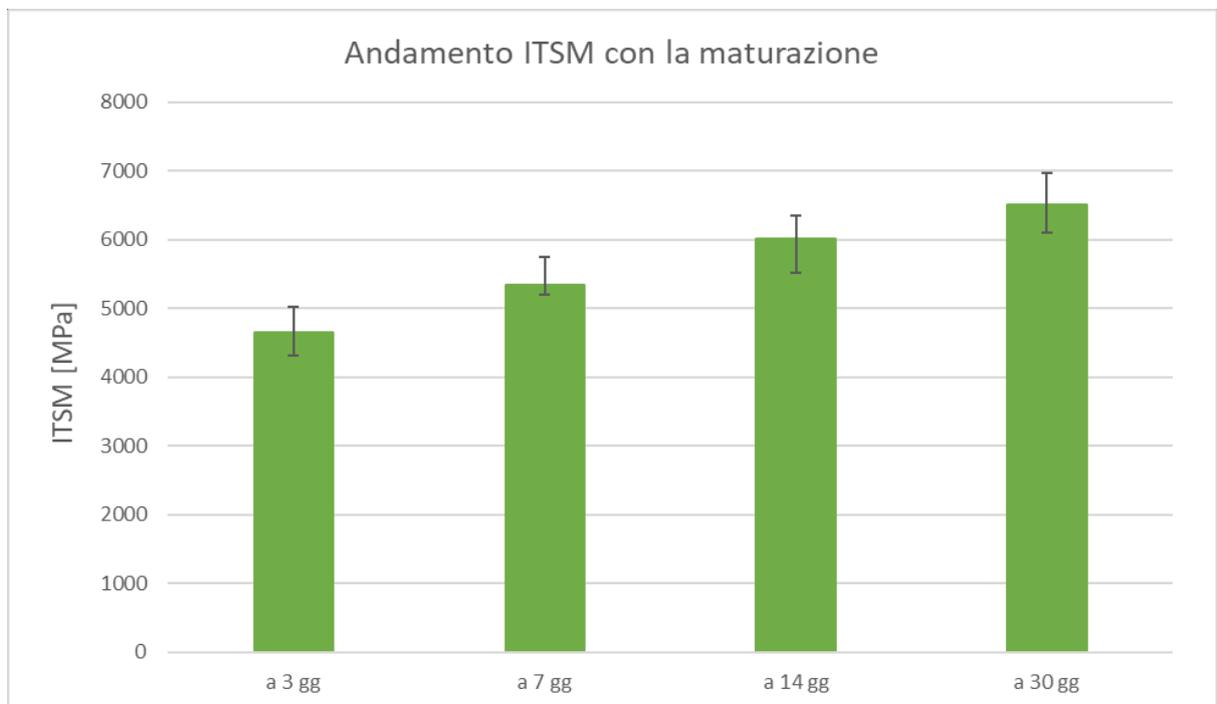


5.2 Miscela con emulsione Modificata:

Codice	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h _m [mm]	D [mm]
AP_1	70,7	71,2	70,6	70,7	70,8	150
AP_2	71	70,9	70,8	70,9	70,9	150
AP_3	71,3	71,1	70,7	70,7	71,0	150
AP_4	71	70,7	71,1	71,5	71,1	150
AP_5	71,2	71,3	71,3	71,5	71,3	150
AP_6	71,5	71,8	71,6	71,4	71,6	150
AP_7	72,2	71,5	71,5	72,1	71,8	150
BP_8	70,3	70,1	70,3	70,6	70,3	150
BP_9	70,3	70,3	70,4	71,2	70,6	150
BP_10	71,2	71,2	71	71,1	71,1	150
BP_11	70,8	71	71	71,1	71,0	150
BP_12	70,7	70,6	71	71	70,8	150
BP_13	71	70,7	71,3	71,1	71,0	150
BP_14	71	71,1	71,3	71,2	71,2	150
CP_15	70,2	70,2	70,4	70,5	70,3	150
CP_16	70,3	70,4	70,4	70,4	70,4	150
CP_17	70,7	71	70,6	70,5	70,7	150
CP_18	70,4	70,4	70,7	70,8	70,6	150
CP_19	70,7	71,2	71,3	71,3	71,1	150
CP_20	71,4	71,3	71,3	71,5	71,4	150

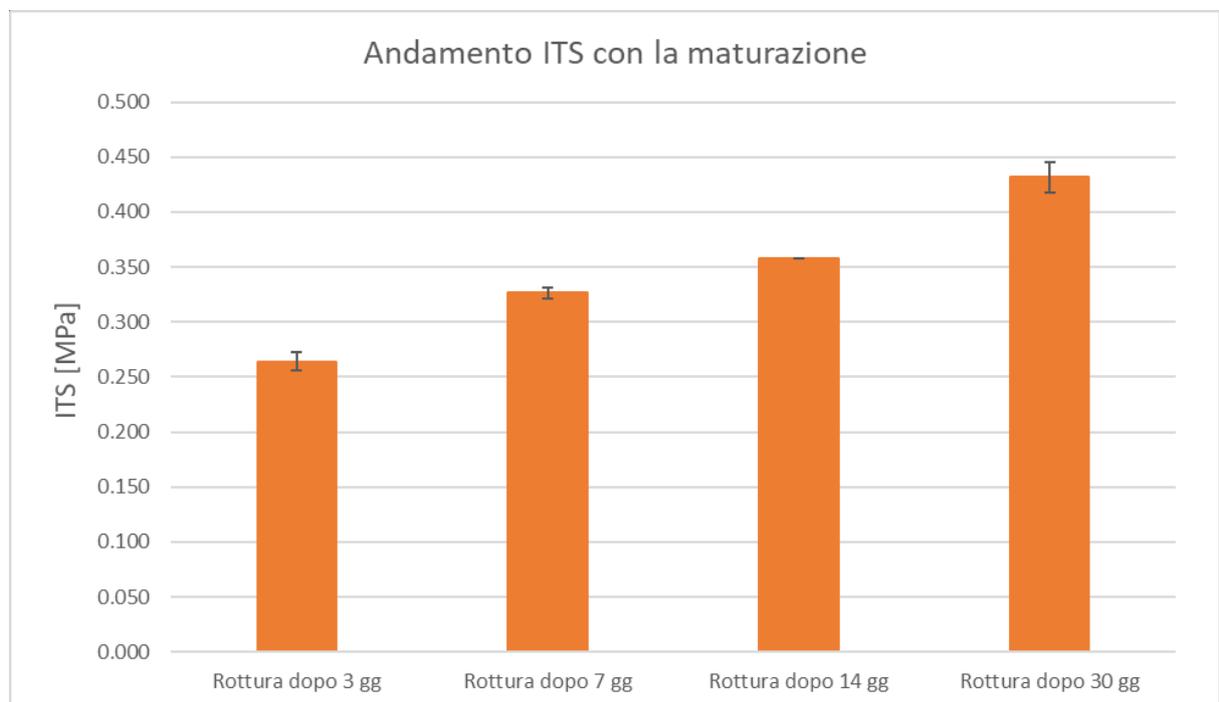
Prova di modulo:

Codice	ITSM											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AP_1	4462	4517	4490	5374	5269	5322	6015	5851	5933	6491	6286	6389
AP_3	4805	4615	4710	5535	5474	5505	6291	6137	6214	6784	6763	6774
AP_5	4683	4662	4673	5477	5260	5369	6138	6107	6123	6692	6538	6615
AP_7	4843	4575	4709	5467	5469	5468	6055	5931	5993	6690	6536	6613
BP_9	4736	4502	4619	5492	5153	5323	6048	5824	5936	6713	6246	6480
BP_11	5137	4888	5013	5953	5531	5742	6387	6306	6347	7175	6760	6968
BP_13	4742	4593	4668	5255	5243	5249	6062	6153	6108	6466	6309	6388
CP_15	4340	4283	4312	5038	5021	5030	5703	5330	5517	6156	6028	6092
CP_17	4524	4433	4479	5169	5225	5197	5939	5856	5898	6349	6189	6269
CP_19	4856	4635	4746	5236	5308	5272	6036	6071	6054	6684	6407	6546
		media	4642		media	5347		media	6012		media	6513



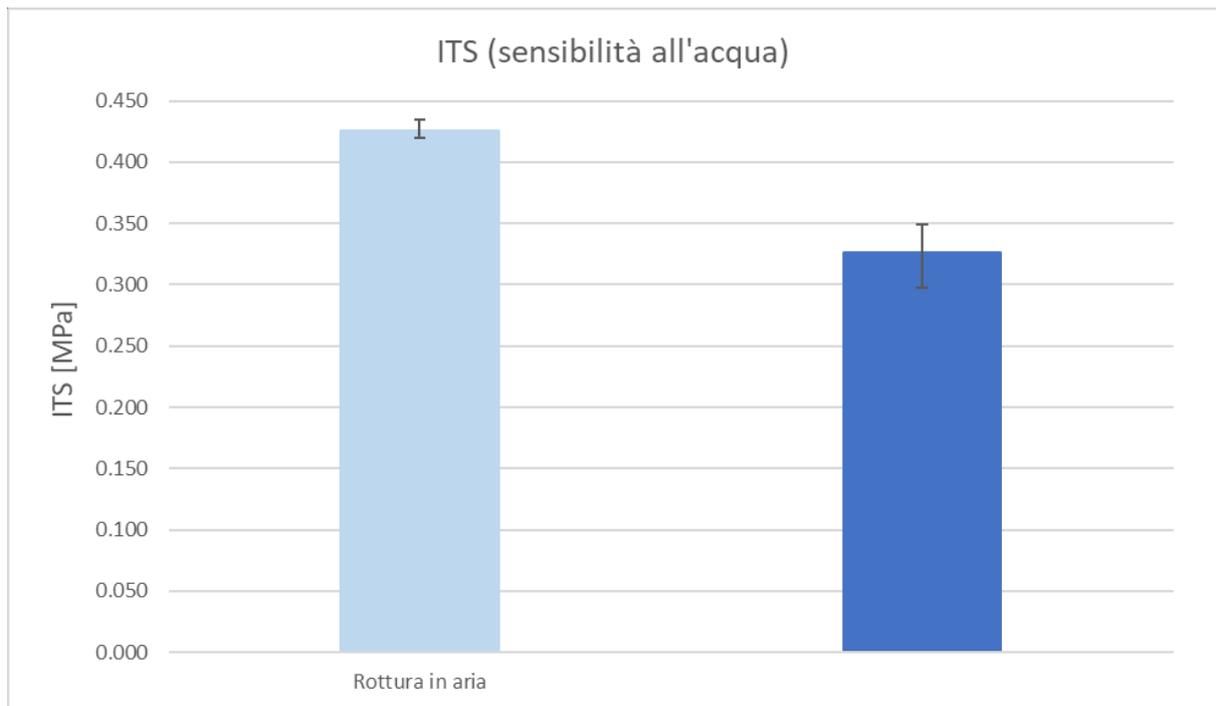
Rottura:

Codice	ITS											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
AP_2	0.0199	4.562	0.273	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AP_6	-	-	-	-	-	-	0.01134	5.7295	0.34	-	-	-
BP_8	-	-	-	0.02014	5.70517	0.344	-	-	-	-	-	-
BP_10	-	-	-	-	-	-	0.0162	6.307	0.376	-	-	-
BP_12	0.01591	4.2614	0.255	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BP_14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01165	7.2614	0.433
CP_16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01645	7.1307	0.430
CP_20	-	-	-	0.01532	5.19757	0.309	-	-	-	-	-	-
		media	0.264		media	0.327		media	0.358		media	0.432



Sensibilità d'acqua:

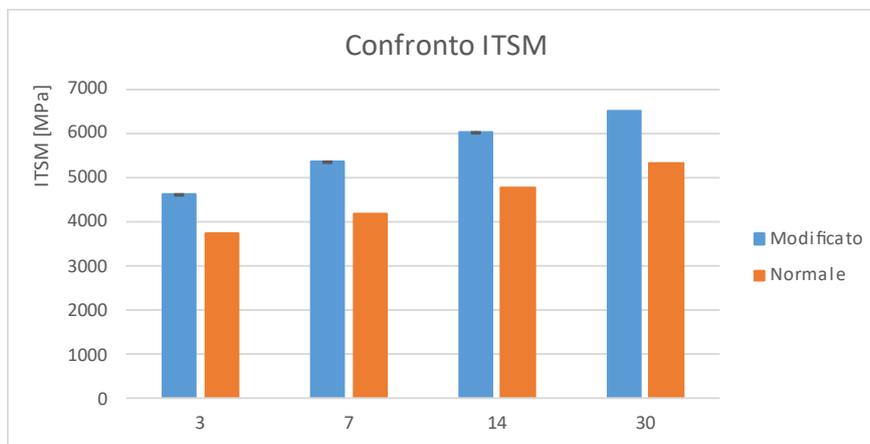
Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
DP_21	0.014263	7.599	0.450	-	-	-	0.77
DP_22	0.01485	7.210	0.427	-	-	-	
DP_23	0.015253	6.781	0.401	-	-	-	
EP_24	-	-	-	0.017766	6.000	0.358	
EP_25	-	-	-	0.015442	5.809	0.347	
EP_26	-	-	-	0.012855	4.584	0.274	
		media	0.426		media	0.326	

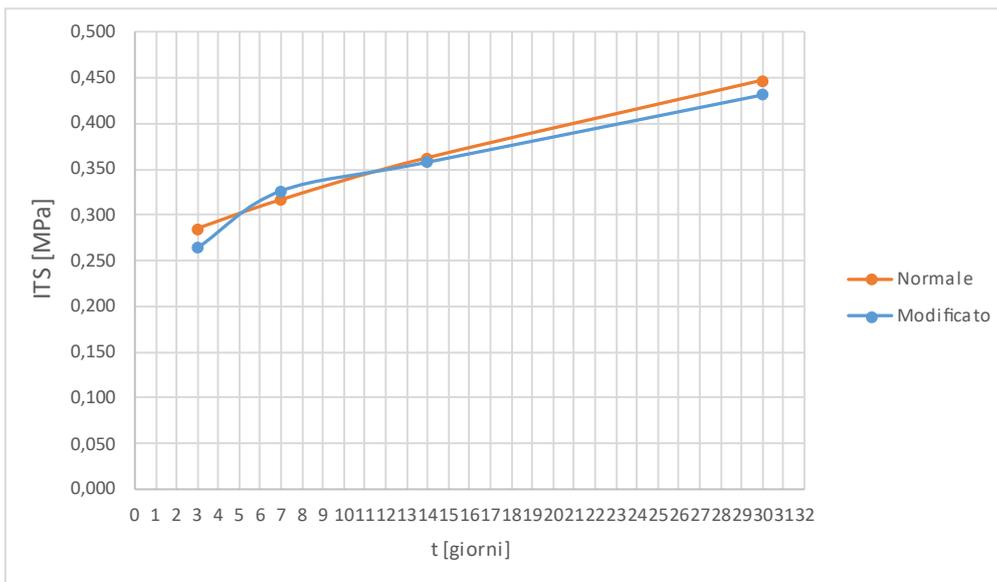
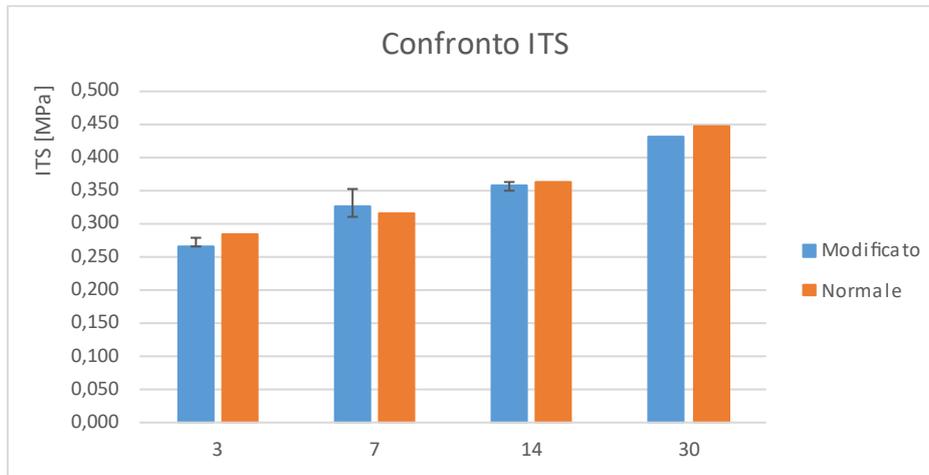
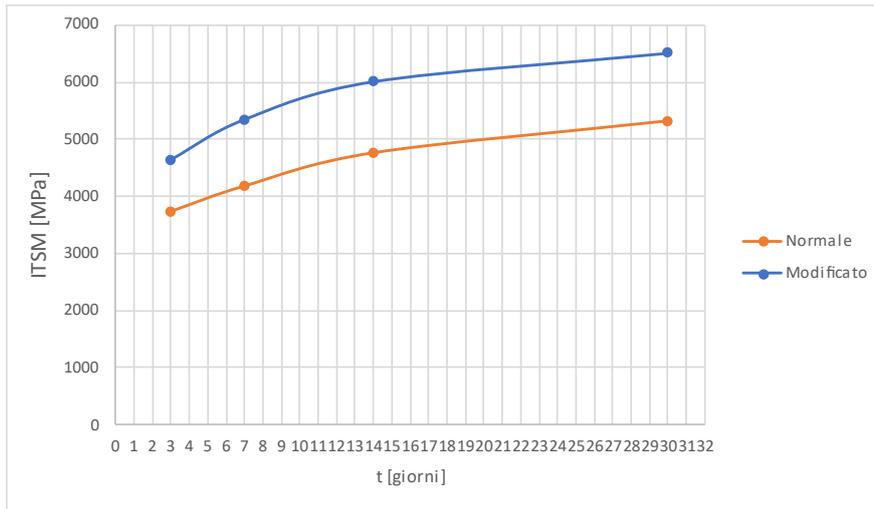


5.3 Confronto miscele:

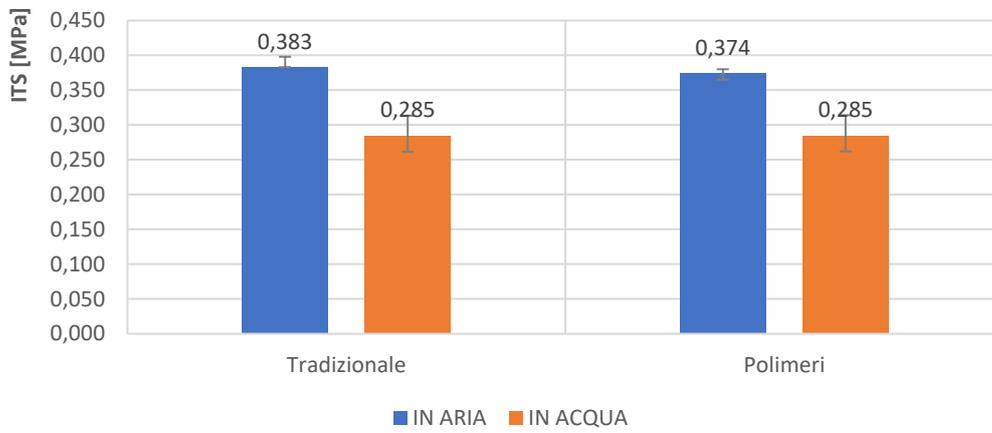
Di seguito sono riportati i confronti delle due diverse miscele (con emulsione normale e modificata) per le varie prove effettuate:

Grafici:

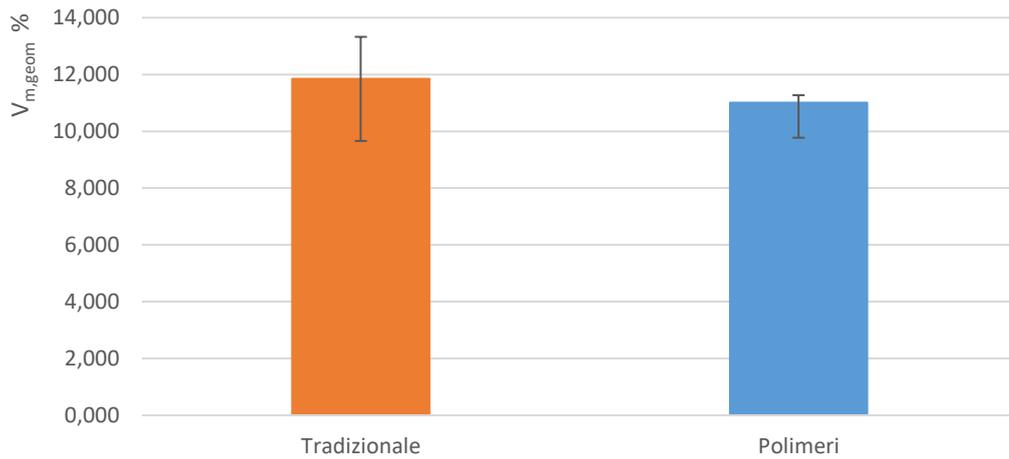




Confronto ITS (sensibilità all'acqua) a 14 giorni



Confronto $V_{m,geom}$ a 30 giorni



Capitolo 6 - Conclusioni:

Nella presente tesi sono state valutate le proprietà di rigidità, resistenza a trazione indiretta e sensibilità all'acqua.

In conclusione, al termine del piano sperimentale possiamo dedurre le seguenti considerazioni:

- Dai risultati delle prove ITSM e ITS si evidenzia che entrambi gli impasti realizzati con diversa tipologia di emulsione hanno un trend crescente di valori fino a 30 giorni. Dopodiché, l'andamento tende ad un asintoto orizzontale;
- i valori di ITSM per l'emulsione modificata con polimeri sono maggiori di quella normale ad ogni grado di maturazione
- nel caso delle prove ITS ci sono delle differenze ad ogni grado di maturazione, ma esse potrebbero essere dovute più che altro a problemi di ripetibilità delle prove poiché i provini testati sono soltanto 2 per ogni grado di maturazione;
- non si notano sostanziali differenze tra le due emulsioni in termini di sensibilità all'acqua.

Ringraziamento:

finalmente il giorno è arrivato: scrivere queste frasi di ringraziamento è il tocco finale della mia tesi. È stato un periodo di profondo apprendimento, non solo a livello scientifico, ma anche personale, Vorrei spendere due parole di ringraziamento nei confronti di tutte le persone che mi hanno sostenuto e aiutato durante questo periodo.

vorrei ringraziare Prof. Maurizio Bocci, relatore di questa tesi di laurea, oltre che per l'aiuto fornitomi la grande conoscenza che mi ha donato, per la disponibilità e precisione dimostratemi durante tutto il periodo.

Un ringraziamento particolare un grande ringraziamento a mia madre e mio padre che, con il loro dolce e instancabile sostegno, sia morale che economico, mi hanno permesso di arrivare fin qui davanti a voi oggi, contribuendo alla mia formazione personale.

Vorrei infine ringraziare tutti i miei amici (e con tutti, intendo proprio tutti!) hanno avuto un peso determinante nel conseguimento di questo risultato, punto di arrivo e contemporaneamente di partenza della mia vita. vi voglio bene.

Un sentito grazie a tutti!

Mohamad yahya