

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Influenza del filler sulle caratteristiche meccaniche degli strati di base riciclati a freddo

Influence of filler on the mechanical properties of cold recycled base layers

Relatore: Tesi di Laurea di:

Prof. Ing. Maurizio Bocci Davide Verlengia

Correlatore:

Ing. Emiliano Prosperi

Anno Accademico 2020 - 2021

Sommario

Capitolo 1	- Intr	roduz	ione 1
Capitolo 2	- Sta	to de	ll'arte3
	2.1	Ricio	claggio del conglomerato bituminoso
	2.2	La p	avimentazione stradale
	2.3	Tecr	niche di riciclaggio7
	2.4	Ricio	claggio a caldo 8
	2.5	Ricio	claggio a freddo9
	2.	.5.1	Riciclaggio in impianto9
	2.	.5.2	Riciclaggio in situ
	2.	.5.3	Emulsione bituminosa
	2.	.5.4	Filler
	2.	.5.5	Cemento
	2.	.5.6	Acqua
		2.5.	6.1 Ruolo dell'acqua20
	2.	.5.7	Requisiti di capitolato
Capitolo 3	- Ma	terial	li24
	3.1	RAP	25
	3.	1.1	RAP A
	3.	1.2	RAP B
	3.	.1.3	RAP C
	3.2	Fille	r calcareo30
	3.3	Emu	ılsioni Bituminose32

	3.4	Cer	nento	Portland
Capitolo 4	- Tes	st Me	ethods	e Programma Sperimentale
	4.1	Obl	biettiv	i36
	4.2	Арр	oarecc	hiature e protocolli di prova36
	4.	.2.1	Anali	si granulometrica36
	4.	.2.2	Picno	ometro40
		4.2	.2.1	Procedura per il calcolo dell'assorbimento aggregati 31.5-4 mm 42
		4.2 mm	.2.2 1	Procedura per il calcolo dell'assorbimento aggregati 4-0.063 43
	4.	.2.3	Prepa	arazione dei provini45
	4.	2.4	Press	sa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)51
	4.	.2.5	Dete	rminazione delle proprietà volumetriche59
		4.2 5)	.5.1	Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697- 59
		4.2	.5.2	Determinazione della massa volumica apparente (UNI EN
		126	97-6)	60
		4.2	.5.3	Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8) 60
	4.	.2.6	Prova	a di Modulo a Trazione Indiretta (UNI EN 12697-26)61
	4.	.2.7	Prova	a di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)72
	4.3	Pro	gramr	ma Sperimentale77
	4.	3.1	Fase	preliminare78
		4.3	.1.1	Classificazione del materiale
		4.3	.1.2	Elaborazione dei dati del picnometro 80
		4.3	.1.3	Miscele di prova81
	4.	.3.2	Seco	nda fase87
		4.3	.2.1	Codifica provini

Capitolo 5	- An	alisi d	dei risultatidei risultati	89
	5.1	Cur	ve di compattazione e Parametri di lavorabilità	90
	5	.1.1	Impasto F0%	91
	5	.1.2	Impasto F2.0	92
	5	.1.3	Impasto F3.5	93
	5	.1.4	Impasto F5.0%	94
	5	.1.5	Impasto F6.5%	95
	5	.1.6	Confronto parametri di compattazione	96
	5.2	Per	dita di acqua	96
	5	.2.1	Impasto F0%	96
	5	.2.2	Impasto F2.0%	97
	5	.2.3	Impasto F3.5%	97
	5	.2.4	Impasto F5.0%	98
	5	.2.5	Impasto F6.5%	98
	5	.2.6	Confronto moisture loss	99
	5.3	Vuo	oti	100
	5.4	Pro	ve di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	101
	5	.4.1	Impasto F0%	101
	5	.4.2	Impasto F2.0%	101
	5	.4.3	Impasto F3.5%	102
	5	.4.4	Impasto F5.0%	102
	5	.4.5	Impasto F6.5%	103
	5	.4.6	Confronti risultati ITSM	103
	5.5	Pro	ve di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	105
	5	.5.1	Impasto F0%	106
	5	.5.2	Impasto F2.0%	108

5.5.3	Impasto F3.5%	111
5.5.4	Impasto F5.0%	113
5.5.5	Impasto F6.5%	116
5.5.6	Confronti risultati ITS	118
Capitolo 6 - Conclu	sioni	121
Capitolo 7 - Bibliog	rafia e Sitografia	i

Capitolo 1 - Introduzione

Le prestazioni delle pavimentazioni flessibili e semi-rigide in termini di sicurezza stradale e durabilità sono strettamente condizionate dal comportamento in opera dei conglomerati bituminosi.

Questi, infatti sono soggetti ad una progressiva variazione delle proprie caratteristiche meccaniche e funzionali a causa dell'azione degradante indotta sia dal traffico che dagli agenti atmosferici.

Conseguenza di ciò sono numerosi gli ammaloramenti, che conducono ad un abbattimento della vita utile, e a continui interventi di manutenzione.

Ogni anno la costruzione di nuove strade e il rifacimento di quelle giunte al termine della vita di servizio comportano, non solo un considerevole consumo di pregiate risorse non rinnovabili, quali bitume ed aggregati lapidei, ma anche la produzione di grandi quantità di materiale di risulta proveniente dalla dismissione degli strati bituminosi degradati.

Per questo motivo la comunità scientifica internazionale evidenzia l'importanza di riuscire a reimpiegare tali materie, note come RAP, Reclaimed Asphalt Pavement, ma comunemente definite fresato, per il rifacimento di nuovi strati sia superficiali che portanti.

Ciò ha portato la tecnica stradale a considerare diversi metodi di riciclaggio, con l'obiettivo di reinserire nel ciclo produttivo dei conglomerati bituminosi il materiale fresato, contenendo sia i consumi di risorse pregiate, che la produzione di rifiuti e minimizzando i costi di produzione. Tutto questo nell'ottica dell'eco-sostenibilità e dell'economia circolare.

Nei prossimi capitoli, infatti, si analizzeranno i risultati prestazionali forniti da un conglomerato, utilizzato per lo strato di base, ottenuto attraverso la tecnica del riciclaggio a freddo della pavimentazione esistente in situ. In particolare, si sono andate a valutare le caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato, al variare della percentuale di filler di aggiunta utilizza.

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

- Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)
- Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

I risultati ottenuti da ogni prova, suddivisi per impasti, sono poi stati successivamente commentati.

La presente tesi si sviluppa in sette capitoli:

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

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

- Capitolo 3 Materiali: Vengono illustrati i materiali utilizzati e le loro caratteristiche.
- Capitolo 4 Test Methods e Programma Sperimentale: Vengono elencate tutte le procedure di laboratorio eseguite, il confezionamento delle miscele e viene illustrato il programma sperimentale su cui si è sviluppata la presente tesi.
- Capitolo 5 Analisi dei risultati: Si riportano i risultati ottenuti dalle varie prove eseguite, i confronti, grafici e tabelle opportunamente presentati e commentati.
- Capitolo 6 Conclusioni
- Capitolo 7 Bibliografia e Sitografia

Capitolo 2 - Stato dell'arte

2.1 Riciclaggio del conglomerato bituminoso

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali ha inizio in Italia all'incirca negli anni '70, grazie alla fresatura degli strati superficiali. Con il termine "riciclaggio" per quanto riguarda le pavimentazioni stradali, si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. I vantaggi che portano ad utilizzare questa tecnica sono diversi:

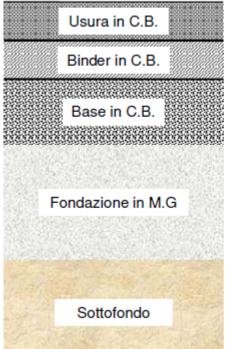
- riduzione dei territori da destinare a discarica
- abbattimento dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti
- riduzione dell'impiego di materie prime vergini
- conservazione dell'energia
- vantaggi economici
- vantaggi tecnici

In questo capito in particolare verrà descritto il conglomerato bituminoso riciclato a freddo [paragrafo 2.5].

2.2 <u>La pavimentazione stradale</u>

Per definizione la pavimentazione stradale è: "la parte superiore del corpo stradale, normalmente realizzata in più strati, direttamente interessata dal moto dei veicoli". I differenti strati componenti la sovrastruttura hanno caratteristiche differenti in termini di tipologia di materiali, spessori, requisiti strutturali e requisiti funzionali. A seconda del tipo di materiali utilizzati le pavimentazioni stradali si distinguono in rigide, semirigide e flessibili.

Flessibile



Semi-Rigida

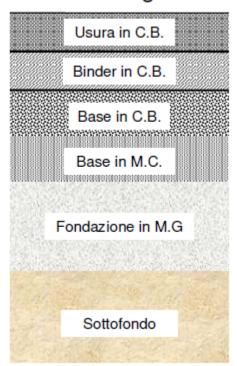


Fig. 2.1 - Schema sovrastruttura flessibile e semirigida

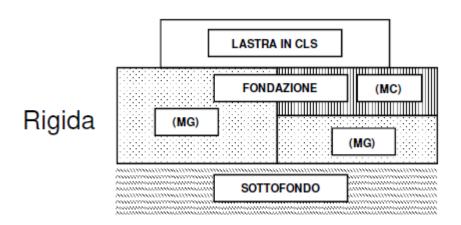


Fig. 2.2 - Schema sovrastruttura rigida

Le miscele, con cui vengono realizzati gli strati, possono essere costituite da materiali granulari, i quali comprendono pietrisco e ghiaia e trasmettono i carichi applicati in profondità, o materiali legati che generano, al di sotto dell'impronta di carico, sollecitazioni di trazione nella metà inferiore dello strato e di compressione nella metà superiore. Le miscele utilizzate per le pavimentazioni sono le seguenti:

- misto granulare, costituito da una miscela non legata di aggregati ottenuti mediante trattamento di materiali naturali, artificiali o riciclati. Nella sovrastruttura stradale il misto granulare è impiegato per la costruzione di strati di fondazione;
- misti cementati, è un materiale ottenuto dalla miscelazione di misto granulare con cemento, utilizzabile come strato di fondazione nelle pavimentazioni stradali di tipo semirigido ed in tutte le condizioni strutturali in cui si vuole incrementare notevolmente la capacità portante dello strato di fondazione su cui poggeranno i conglomerati bituminosi;
- conglomerati bituminosi, miscele composte da aggregati (materiali rocciosi di diversa granulometria) e leganti.

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

- a) <u>Strato d'usura, o tappeto (3-6 cm):</u> è costituito da conglomerato bituminoso a masse chiuse, è la superficie di rotolamento e quindi ha il compito di garantire sicurezza, confort e economicità di marcia. Deve pertanto assicurare elevata e durevole aderenza e presentare buona resistenza alle azioni tangenziali e alle deformazioni.
- b) <u>Strato di collegamento (Binder) (6-8 cm)</u>: è costituito anche esso da conglomerato bituminoso a masse semiaperte, ma con caratteristiche meccaniche lievemente inferiori. Contribuisce, assieme allo strato di base, ad assorbire le azioni flessionali indotte dai carichi.
- c) <u>Strato di Base (8-30 cm):</u> strato a cui è affidato il compito di assorbire la maggior parte delle azioni flessionali indotte dai carichi. Nelle pavimentazioni flessibili è costituito da conglomerato bituminoso (misto bitumato) con minore quantità di bitume, maggiore porosità e caratteristiche meccaniche più basse rispetto ai precedenti strati. Nelle pavimentazioni semirigide, argomento oggetto del presente elaborato, viene

realizzato in misto cementato, in conglomerato bituminoso a caldo con eventuale impiego di massimo il 30% di materiale riciclato oppure in conglomerato bituminoso riciclato a freddo in cui la miscela è composta da almeno il 70% di materiale fresato. La dimensione massima degli aggregati è più elevata e la percentuale di bitume è ridotta rispetto agli strati superiori (il che si traduce in una maggiore porosità). Nel caso del riciclaggio a freddo è previsto l'impiego di emulsione bituminosa o bitume schiumato: gli aggregati sono miscelati con emulsione di bitume modificato (dosaggi tipici compresi tra 3,5% e 4,0% in peso sulla miscela di aggregati) e cemento (dosaggi tra 1,5 – 2,0%) (Anas, Quaderni Tecnici Volume V, 2019, [6]).

- d) <u>Strato di Fondazione (15-35 cm):</u> strato il cui ruolo principale è quello di trasferire i carichi al sottofondo. Generalmente è realizzato in misto granulare, quindi non legato, ma nelle pavimentazioni semirigide può essere anche in misto cementato (legato). Se per motivi economici o di indisponibilità di inerti idonei non si può usare un buon misto granulare, si possono realizzare strati di fondazione in terra stabilizzata a cemento, a bitume o con miscele aggregato-pozzolana-calce.
- e) <u>Sottofondo (50-100 cm)</u>: per sottofondo si intende lo spessore di terreno, su cui poggia la fondazione della pavimentazione, entro il quale risentono, ancora in modo apprezzabile, gli effetti del traffico veicolare. Al sottofondo, quindi, è assegnata la funzione di piano di posa della fondazione per cui i terreni che lo costituiscono devono possedere determinate caratteristiche granulometriche. Per le caratteristiche meccaniche il mezzo più efficace è rappresentato dal costipamento (in genere pari al 95% del peso in volume del secco). [S1]

2.3 Tecniche di riciclaggio

La soluzione migliore per cercare di soddisfare gli interessi ambientali e quelli economici è il riciclaggio. Le motivazioni che spingono a riciclare sono diverse ed ognuna con importanza rilevante, come ben sintetizzano le linee generali del documento "Recycling for road improviments" pubblicato dall'OCSE nel 1997:

- riduzione dell'impiego di materie prime;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- contenere l'inquinamento del suolo e dell'atmosfera dovuto al trasporto e all'incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell'energia;
- convenienza economica;
- vantaggi tecnici;

Il riciclaggio delle pavimentazioni prevede il riutilizzo di quel conglomerato che ha ormai perso le caratteristiche e le funzioni iniziali per le quali era stato destinato. Il "Reclaimed Asphalt Pavement" (RAP), comunemente chiamato fresato, è una miscela di inerti e bitume invecchiato. Il fresato è considerato un rifiuto non pericoloso e rientra in quei materiali da costruzione e demolizione; è un rifiuto certificato e classificato con codice CER 191302.

Il RAP è prodotto per demolizione, che avviene per mezzo di una scarificatura della superficie stradale. Oggi è possibile rimuovere strati di spessore elevato sfruttando nuove attrezzature: fresatrice autocarrata oppure escavatore, scraper o ripper.

Le tecniche più utilizzate che consentono di rimpiegare il materiale, classificate in funzione della procedura di miscelazione tra gli aggregati vergini e quelli di risulta, sono due:

- Riciclaggio a caldo
- Riciclaggio a freddo

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

- Riciclaggio in impianto fisso;
- Riciclaggio in situ.



Fig. 2.3 - schema riciclaggio delle pavimentazioni

2.4 Riciclaggio a caldo

Il riciclaggio a caldo consiste nell'adottare tutte quelle tecniche atte al riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto di confezionamento della miscela, è sufficientemente riscaldato ad una temperatura di oltre 150° C. Con il riciclaggio a caldo si ottengono miscele costituite da:

- aggregati vergini;
- conglomerato bituminoso di recupero in proporzioni variabili dal 20% al 50%;
- bitume tradizionale o modificato;
- eventuali additivi per riattivare il bitume invecchiato.

2.5 Riciclaggio a freddo

Il riciclaggio a freddo sarà trattato in modo più dettagliato rispetto quello a caldo, poiché in questa sperimentazione si utilizza questa tecnica.

La percentuale di fresato che si può riciclare va dal 50-60 % (riciclaggio in impianto) fino al 100% (riciclaggio in sito).

Distinguiamo le seguenti modalità:

- in impianti fissi; specifici per il riciclaggio a freddo.
- in sito; appositi treni di riciclaggio che permettono di riciclare la pavimentazione stradale sul posto.

2.5.1 Riciclaggio in impianto

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. 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.

Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto:

- discontinuo;
- continuo.

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, ma con una minor precisione del dosaggio dei materiali. Come già detto, 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 schiuma di bitume; filler (additivi); acqua di aggiunta,

per un miglioramento della lavorabilità; aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero.

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- un sistema di frantumazione e riselezionatura del fresato;
- due o più predosatori per il fresato e per gli aggregati di integrazione;
- un silos per il cemento con abbinata una coclea a velocità variabile;
- un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa;
- un serbatoio per l'acqua con misuratore di portata;
- un mescolatore di tipo continuo a due alberi;
- rampe di spruzzatura per l'acqua con misuratore di portata;
- rampa per l'emulsione;
- attrezzature e strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire un costante controllo di processo;
- un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro, o apparecchiatura di scarico dal mescolatore.

Dopo una preventiva frantumazione e riselezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini di apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono convogliati al mescolatore, per mezzo di nastri trasportatori; qui avviene la miscelazione, assieme al legante, che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in percentuali che vanno dal 3 al 6%, assieme all'acqua di aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler; i possibili additivi posso essere calcarei o silicei, ma indubbiamente il più utilizzato è il cemento, aggiunto in percentuali che vanno dall'1 al 3%; la sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche del conglomerato in termini di resistenza. Di solito non è presente il silo di stoccaggio del prodotto finito, in quanto il conglomerato riciclato a freddo, viene direttamente scaricato sugli automezzi di trasporto. Bisogna inoltre porre molta attenzione alla preparazione del fresato, prima del suo ingresso nell'impianto, al fine di valutarne correttamente le pezzature, le impurità e l'umidità. Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo così la pavimentazione originaria.

2.5.2 Riciclaggio in situ

il riciclaggio in sito poiché permette di riutilizzare una maggior quantità di conglomerato bituminoso degradato. La tecnica del riciclaggio a freddo prevede una profondità di intervento, sulle pavimentazioni stradali deteriorate, che va da 40 a 200 mm. Il materiale fresato (RAP) può essere legato a bitume o a cemento.

Per confezionare il nuovo conglomerato con la tecnica a freddo oltre al fresato vengono aggiunti, al momento della miscelazione in una impastatrice, leganti quali emulsione bituminosa o bitume schiumato e/o cemento.

Lo strumento utilizzato per il processo di riciclaggio è la macchina riciclatrice, la quale viene progettata per essere in grado di riciclare in una sola passata strati di pavimentazione di grande spessore.

La parte centrale della riciclatrice è costituita dal rotore di fresatura e miscelazione, che è dotato di un grande numero di utensili da taglio speciali. Generalmente, tale rotore ruota in senso opposto a quello di marcia, macinando il materiale della pavimentazione esistente.

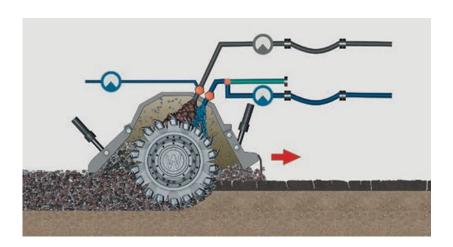


Fig. 2.4 - Esempio di riciclatrice.

Come si evince dalla figura 1.1, mentre la macchina riciclatrice avanza con il rullo di fresatura rotante, l'acqua, contenuta in un'autobotte collegata alla riciclatrice, viene erogata e spruzzata all'interno del vano di miscelazione della riciclatrice. Nel vano di miscelazione vengono iniettati anche i leganti sia singolarmente che insieme.

La macchina riciclatrice costituisce una componente del treno di riciclaggio.

I treni di riciclaggio assumono diverse configurazioni in base alla tipologia di applicazione e al tipo di legante impiegato.

In tutti i casi, la riciclatrice incarna il ruolo di locomotiva trainando l'attrezzatura ad essa agganciata mediante barre di traino.

La composizione tipica del treno di riciclaggio, nel caso in cui si usi un'emulsione bituminosa o bitume schiumato insieme al cemento, è presentata nella Figura1.2.

Il miscelatore spinge l'autocisterna di bitume posta davanti.

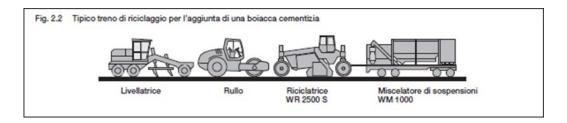


Fig. 2.5 - Treno di riciclaggio con emulsione bituminosa o bitume schiumato e cemento

Durante la marcia, viene steso il nuovo conglomerato e compattato grazie al rullo vibrante posto dietro la riciclatrice.

In ogni caso, sia che la produzione avvenga in impianto o avvenga in sito, è opportuno determinare il mix designo progetto della miscela. Quest'ultimo è il calcolo per l'individuazione della composizione del nuovo conglomerato, tenendo conto degli obiettivi da raggiungere per quanto riguarda la lavorabilità della miscela e la resistenza meccanica. È necessario quindi, determinare i requisiti qualitativi e le quantità di ogni componente (aggregato di primo impiego, cemento, acqua, emulsione bituminosa o bitume schiumato) al fine di ottenere una miscela perfetta.

Per prima cosa si analizzano le caratteristiche del conglomerato di recupero; si prelevano dei campioni di materiale sciolto (RAP) ogni 500 metri dal cantiere operativo (come indicato da Capitolato) e si portano in laboratorio. Si determinano:

- umidità;
- percentuale di bitume presente;
- invecchiamento del bitume;
- tipo e qualità dell'aggregato;
- curva granulometrica degli aggregati;

Per quanto riguarda il bitume, questo deve essere in grado di riattivarsi e quindi ripristinare le qualità iniziali che avrebbe potuto perdere a seguito dell'invecchiamento. È necessario assicurarsi che il legante non sia eccessivamente rigido (si richiede un valore pari a 15dmm per le prove di penetrazione a 25° C (CNR 24/71) e valori del punto di rammollimento minori di 75° C (CNR 35/73)).

Per gli aggregati, viene controllata la loro natura; questi possono essere calcarei o silicei e potrebbero influenzare la compatibilità con il legante vergine, la lavorabilità dell'impasto e l'idonea presa finale. La valutazione dei requisiti per gli aggregati dipende dall'impiego che se ne fa del riciclaggio. Infatti, se il riciclaggio a freddo verrà utilizzato per gli strati più superficiali, è necessario che gli aggregati abbiano mantenuto qualità in termini di resistenza all'abrasione e all'urto. Tali requisiti non sono invece richiesti se il nuovo conglomerato verrà impiegato in altri strati.

La percentuale di conglomerato riciclato da impiegare va obbligatoriamente dichiarata nello studio preliminare della miscela. Prima di tutto occorre determinare la curva granulometrica del fresato per mezzo di un'analisi granulometrica; questa consiste in una vagliatura del materiale attraverso di una pila di setacci disposti in ordine decrescente dall'alto verso il basso.

Il RAP può essere corretto granulometricamente mediante l'aggiunta di inerti vergini di dimensioni tali da rientrare nel fuso richiesto. L'acqua aggiunta deve essere pura ed esente da ogni tipo di sostanza organica. Il cemento, l'emulsione bituminosa e il bitume schiumato (o espanso), sono da considerarsi elementi stabilizzanti per la miscela.

2.5.3 Emulsione bituminosa

L'emulsione bituminosa è un miscuglio che si ottiene combinando un legante (bitume), l'acqua ed un agente emulsionante, sfruttando le proprietà fisiche e chimiche di ogni componente.

L'acqua è la fase disperdente mentre il bitume è la fase dispersa. Si parla di emulsione perché vengono a contatto due sostanze immiscibili tra di loro. L'impiego di emulsione bituminosa per i conglomerati riciclati a freddo permette di ottenere il bitume a temperatura ambiente, comportando i seguenti vantaggi:

- Riduzione delle emissioni in ambiente
- Salvaguardia della salute degli operai
- Minore impatto ambientale
- Riduzione dei costi

Il bitume si presenta sottoforma di goccioline disperse nell'acqua; quando l'acqua evapora rilascia il bitume.

Generalmente la percentuale di bitume impiegata in un'emulsione bituminosa è compresa tra il 50 – 70% (non possiamo adottare una percentuale di bitume maggiore del 70% perché altrimenti si avrebbe un'inversione di fase, ovvero la fase disperdente diventerebbe il bitume e la fase dispersa, l'acqua).

A questo punto è interessante conoscere il tempo necessario affinché il bitume si separi dall'acqua; questo fenomeno viene chiamato rottura dell'emulsione e la velocità con cui si verifica viene chiamata velocità di rottura.

Quest'ultima si sviluppa in tre fasi:

- Decantazione: separazione di acqua e bitume. Preso un fusto di emulsione prodotta,
 le gocce di bitume tendono a scendere per gravità e si addensano sul fondo;
- Flocculazione: le gocce di bitume tendono a sovrapporsi;
- Coagulazione: fusione delle gocce di bitume e formazione dei coaguli;
- Rottura: l'acqua rimasta in superficie tende ad evaporare e rilascia solo il bitume.

Per la produzione di conglomerati bituminosi a freddo si richiede che la rottura avvenga solo dopo la compattazione in sito. A tale scopo si utilizzano emulsioni bituminose con velocità di rottura molto basse, che garantiscono una migliore qualità della miscelazione, sia con il filler sia con il cemento. Esse hanno la capacità di non rompersi anche in presenza di significative quantità di cemento. Quest'ultimo, infatti, genera un innalzamento del pH dell'emulsione, che può causare una perdita di efficacia dell'agente emulsionante.

La velocità di rottura dipende da molteplici fattori e varia da 2 a 10, dove 2 indica una velocità di rottura molto elevata, che si verifica in un breve tempo, mentre 10 indica una velocità di rottura molto ridotta, quindi che si verifica in tempo elevato.

I fattori che influenzano i processi di rottura e di presa sono molteplici, tra essi assumono particolare importanza:

- la tipologia di aggregato, in termine di assortimento granulometrico, contenuto di vuoti e velocità di assorbimento dell'acqua;
- umidità della miscela prima e dopo il costipamento;
- temperatura degli aggregati e dell'aria;
- forze meccaniche derivanti dal pompaggio, dal costipamento e dal traffico;
- contenuto totale del liquido: definisce il rapporto umidità/densità dell'emulsione, è di notevole rilevanza perché il bitume e l'acqua agiscono da lubrificanti, favorendo il costipamento;
- modalità esecutive e tipologie di applicazione.

È necessario studiare l'affinità dell'agente emulsionante con il bitume. Infatti:

- se l'agente emulsionante è di origine cationica, rilascia sulla superficie del bitume cariche positive;
- se l'agente emulsionante è di origine anionica, rilascia sulle particelle di bitume cariche negative.

Indipendentemente dal fatto che l'emulsione sia cationica o anionica, tutte le goccioline di bitume sono rivestite della stessa carica; quindi, tendono a respingersi tra loro; questo garantisce una dispersione ottimale del bitume in acqua.

L'utilizzo di un emulsionante cationico o anionico dipende dal tipo di aggregati presenti nella miscela; un'emulsione di tipo anionica interagisce bene con aggregati calcarei perché questi, in presenza di acqua, tendono a caricarsi positivamente.

Lo stesso concetto non si può invece applicare agli aggregati silicei, perché si caricano negativamente venendo a contatto con l'acqua. Pertanto, si può affermare che l'emulsione cationica interagisce bene con aggregati silicei mentre ha delle difficoltà con aggregati calcarei.

Tuttavia, la presenza di bitume, che può essere neutro o carico negativamente per sua natura, favorisce comunque l'interazione.

Generalmente le emulsioni che vengono utilizzate nel settore stradale sono emulsioni cationiche.

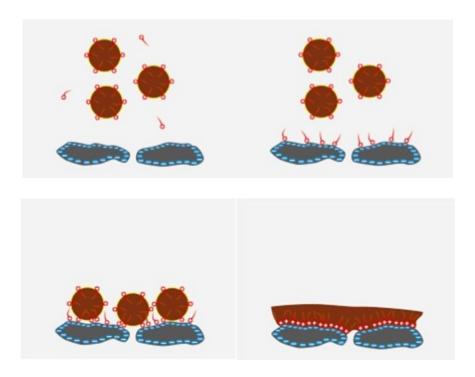


Fig. 2.6 - Fasi di rottura di un'emulsione cationica

Le emulsioni bituminose vengono denominate in relazione: al tipo di emulsionante (cationico o anionico), alla percentuale di bitume impiegata, al tipo di bitume (semplice o modificato) e alla velocità di rottura.

In particolare:

- il primo termine: la lettera indica se l'emulsione è cationica (C) o anionica (A);
- il secondo termine: il numero indica la percentuale di bitume impiegato;
- il terzo termine: la lettera indica l'impiego di bitume semplice (B);
- il quarto termine: la lettera indica se il bitume è modificato con polimeri (P);
- il quinto termine: la lettera indica l'aggiunta di un flussante con una percentuale maggiore del 3% (F);
- l'ultimo termine: il numero indica la velocità di rottura e conseguentemente il tempo di rottura. In questo caso al fresato stradale viene aggiunto prima il cemento e poi una miscela di bitume, acqua ed emulsionanti per garantire coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato.

2.5.4 *Filler*

Come noto ormai da tempo, le prestazioni a rottura del conglomerato bituminoso sono strettamente legate alle proprietà del mastice di cui è composto, e di conseguenza alle caratteristiche del filler e del bitume [1]. Il filler è infatti la componente irrigidente del mastice, che concorre all'aumento della resistenza alle deformazioni permanenti della miscela ad alte temperature, ed all'aumento della resistenza a fatica a medie e basse temperature. L'influenza del filler dipende dall'effetto volumetrico e/o chimico-fisico dell'interazione che si instaura con il legante. Un ruolo fondamentale nell'aumento della rigidezza del mastice è giocato dal valore dei vuoti frazionari del filler; tale parametro è stato impiegato come indicatore del potere irrigidente del filler a partire dal 1947, anno in cui Rigden introdusse il relativo test, "Rigden Voids" [2]. Per la determinazione dei vuoti frazionari dei filler, si segue l'approccio procedurale contenuto nella Norma europea UNI EN 1097-4. Mediante tale procedura è possibile definire la porosità intergranulare del filler secco compattato. Per indagare la composizione mineralogica dei filler viene utilizzata la tecnica difrattometrica a raggi X. A determinare la rigidezza finale del mastice è poi l'interazione che si instaura con il legante, il quale può essere naturale oppure modificato con polimeri di modifica. Da uno studio effettuato dall'Università di Parma [S2] risulta che il valore dei vuoti frazionari è un importante indicatore del potere irrigidente del filler, le caratteristiche del filler influiscono maggiormente sulla rigidezza dei mastici alle basse temperature e sulla resistenza a rottura alle temperature intermedie; per quanto riguarda il comportamento del mastice a temperature elevate, invece, risulta non esistere una relazione univoca con le proprietà del filler. Nell'ambito del riciclaggio a freddo l'uso del filler permette di creare un miglior adesione del mastice con gli aggregati, inoltre la presenza di questo materiale facilita il rilascio dell'acqua, contenuta all'interno dell'emulsione bituminosa, la quale permette una migliore idratazione del cemento. Lavorando sulla finezza del filler e del cemento si possono avere ottime risposte in termini di forza di adesione aggregato-mastice, ma l'inserimento di un filler troppo fino provocherebbe una perdita di prestazione [3]. Anche nel dosaggio bisogna porre attenzione in quanto una quantità eccessiva di filler incrementa in maniera sensibile la superficie specifica offerta dagli aggregati e, quindi, aumenta la velocità di rottura dell'emulsione, inoltre la presenza eccessiva del filler realizza con l'emulsione una pasta viscosa, mentre gli aggregati di dimensioni maggiori potrebbero non essere completamente rivestiti dal legante organico [3].

2.5.5 Cemento

Il primo impiego del cemento risale al 1917 negli Stati Uniti. La funzione principale è quella di aumentare la resistenza e, a tal fine, è opportuno introdurre una quantità adeguata di cemento. Infatti, contrariamente a quanto alcuni ritengono, aggiungere troppo cemento renderebbe la miscela più fragile, quindi con prestazioni minori in termini di resistenza. E' fondamentale conoscere i requisiti di efficienza e indicarli al fine di condurre uno studio specifico sulla miscela, andando a determinare il giusto quantitativo di cemento.

Il cemento (o cemento Portland) è una polvere che, mescolata con acqua, nel giro di qualche minuto perde la sua iniziale plasticità (presa) e assume rigidezza (indurimento).

La polvere viene prodotta tramite un processo industriale che consiste nella cottura in forno di terre naturali (clinker) e successiva macinazione. I cementi vengono classificati in base alla loro resistenza. La normativa individua ben 25 diversi tipi di cemento; questi vengono denominati da una un numero e una lettera N o R. Il numero sta ad indicare il valore di resistenza meccanica a compressione misurata a 28 giorni di stagionatura (tempo di maturazione). La lettera indica la resistenza alle brevi stagionature; rispettivamente, R per una resistenza meccanica pari a 10 N/mm2 a due giorni di stagionatura mentre N per resistenza meccanica pari a 16 N/mm2 a 7 giorni di stagionatura.

Inoltre, è possibile individuare altri tipi di cemento che si differenziano per la presenza in percentuali variabili di costituenti tutti di natura minerale, che includono: pozzolanica vulcanica, naturale, loppa d'altoforno.

Il cemento pozzolanico si differisce per la presenza della pozzolana. Il cemento d'altoforno è simile al cemento pozzolanico, ma si sostituisce la pozzolana con la loppa d'altoforno. Quest'ultima è di origine industriale ed in grado di indurire, quindi di aumentare la resistenza meccanica della miscela.

2.5.6 <u>Acqua</u>

L'acqua svolge un ruolo importante nella produzione di miscele in conglomerato bituminoso; quindi, bisogna prestare attenzione a quale utilizzare: infatti l'acqua che si trova in natura può non risultare adatta ad essere impiegata in un materiale stabilizzato con emulsione e cemento

a causa delle impurità in essa presenti, sia in soluzione, sia in sospensione. In particolare, l'eventuale presenza di ioni positivi e negativi può influenzare le proprietà delle emulsioni di bitume. L'acqua utilizzata deve, quindi, essere esente da impurità dannose, oli, acidi, alcali, materia organica e qualsiasi altra sostanza nociva che possa alterare le proprietà della miscela e influire negativamente sui processi necessari per la sua maturazione.

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

In molti elementi del conglomerato che deve essere realizzato in opera è presente acqua, ovvero all'interno:

- dell'emulsione bituminosa;
- delle frese nel processo di demolizione;
- della eventuale boiacca cementizia;
- del fresato, poiché l'umidità al suo interno è estremamente variabile a seconda delle condizioni atmosferiche.

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

2.5.6.1 Ruolo dell'acqua

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

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

Nel riciclaggio a freddo, un fattore importante è la lavorabilità e l'addensamento dei conglomerati bituminosi. Questa metodologia presenta dei limiti pratici che ritroviamo nella difficoltà di impastare i componenti della miscela e di costipare il materiale, una volta steso.

La lavorabilità della miscela è funzione dell'umidità della miscela: una maggiore umidità implica una migliore lavorabilità.

L'emulsione bituminosa, che è un prodotto liquido, non riesce a soddisfare da sola il quantitativo d'acqua richiesto dalla lavorabilità. Anche la presenza del cemento nella miscela non agevola tale proprietà. Per ovviare a tale inconveniente si può operare incrementando il contributo di acqua nell'impasto, pur nel rispetto dei quantitativi ottimali.

Naturalmente un quantitativo di acqua maggiore agevola notevolmente la lavorabilità del conglomerato, rendendolo più fluido; tuttavia, data l'incomprimibilità dei liquidi che si oppone all'azione compattante dei mezzi d'opera, un eccesso di questi tende a limitare l'addensabilità pregiudicando le proprietà meccaniche e la durata della miscela.

2.5.7 Requisiti di capitolato

La sperimentazione fa riferimento al capitolato di Bolzano, dove vengono illustrate le percentuali ottimali di emulsione bituminosa (di bitume modificato con polimeri) cemento, acqua e dell'eventuale integrazione di aggregati sono stabilite mediante uno specifico studio in laboratorio. Nel caso di riciclaggio del conglomerato bituminoso della pavimentazione esistente, per una corretta valutazione delle caratteristiche del materiale della tratta stradale

interessata, devono esser eseguiti prelievi ogni 500 m, eventualmente intensificati in caso di disomogeneità. La granulometria della miscela finale di aggregati deve essere compresa nel fuso indicato nella Tabella A.4.

Tabella A.4		
Capitolo 3 -	Serie setacci	Capitolo 4 - Passanti
IS	0	
	mm	%
Setaccio	80	100
Setaccio	63	95-100
Setaccio	40	85-100
Setaccio	22.5	70-95
Setaccio	10	50-75
Setaccio	4	30-42
Setaccio	2	20-35
Setaccio	0.5	10-18
Setaccio	0.063	4-8

Il fresato può essere corretto granulometricamente mediante granulazione e/o vagliatura ovvero mediante l'aggiunta di inerti di dimensioni e caratteristiche tali da riportare la curva granulometrica nel fuso richiesto.

Quando è prevista la miscelazione con pulvimixer i campioni degli aggregati per lo studio della miscela devono esser prelevati in cantiere, subito dopo un passaggio di pulvimixer senza la stesa dei leganti. Prima di definire la giusta combinazione di leganti, deve essere determinato il contenuto ottimale di acqua sulla miscela granulare con il 2% in peso di cemento, secondo le indicazioni riportate nella Tabella B1.

I provini con diverso contenuto di acqua devono essere compattati con pressa giratoria (UNI EN 12697-31) nelle seguenti condizioni di prova:

Tipo di fustella: NON drenata

• Angolo di rotazione: 1.25° ± 0.02°

Velocità di rotazione: 30 rotazioni al minuto

• Pressione verticale: 600 kPa

Dimensioni provino: 150 mm

• n° giri: 100

Peso campione: 2800 g (comprensivi di cemento e acqua)

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

Tabella B.1						
Cemento [%]			2	,0		
Acqua [%]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Provini [n°]	3	3	3	3	3	3

Ogni provino deve essere pesato prima e dopo la compattazione al fine di determinare la percentuale di (eventuale) acqua espulsa.

I provini così ottenuti devono essere essiccati fino a peso costante in stufa a 40°C e sottoposti a prova per la valutazione della massa volumica (UNI EN 12697-6/procedura D). Il contenuto ottimo di acqua sarà quello che permette di raggiungere il valore più elevato di massa volumica della miscela (secca) e un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione minore dello 0,5%.

Secondo la stessa procedura di compattazione e con il contenuto di acqua ottimo, devono essere confezionati provini con differenti quantità (percentuali riferite al peso degli inerti) di cemento ed emulsione bituminosa (di bitume modificato con polimeri), come indicato nella Tabella B.2.

Tabella B.2									
Acqua [%]	Contenuto ottimo								
Cemento [%]	1,5			2,0			2,5		
Emulsione bituminosa [%]	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0
Provini [n°]	4	4	4	4	4	4	4	4	4

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

I provini così confezionati devono subire una maturazione a 40 °C per 72 ore e successivamente devono essere sottoposti a prova di resistenza a trazione indiretta (UNI EN 12697/23), dopo un condizionamento per 4 ore in camera climatica a 25 °C. Tali provini devono fornire resistenza a trazione indiretta ITS > 0,35 MPa.

Sui provini confezionati con le miscele che soddisfano i requisiti di resistenza a trazione indiretta, maturati per 72 ore a 40 °C, si devono determinare:

- modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (spostamento orizzontale imposto 5±0.2 μm) secondo la Norma UNI EN 12697/26;
- perdita di resistenza dopo imbibizione a 25 °C per 1 ora sottovuoto a 50 mm di mercurio.

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

Sulla miscela ottima si deve determinare la densità geometrica a 100 giri di pressa giratoria che costituisce il riferimento per il controllo della densità in sito.

Capitolo 3 - Materiali

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

- RAP in tre diversi frazionamenti (A, B, C);
- filler;
- cemento Portland;
- acqua;
- emulsione bituminosa.

3.1 <u>RAP</u>

Il fresato o R.A.P. (Reclaimed Asphalt Pavement) è il materiale di recupero che si ottiene da interventi di fresatura su pavimentazioni ammalorate o dalla frantumazione a blocchi (scarifica). Può quindi essere considerato alla stessa maniera di un materiale inerte bitumato e non consolidato. La curva granulometrica che in genere caratterizza il fresato è costituita da un elevata percentuale di fini, contenenti bitume invecchiato. Le tre frazioni di fresato utilizzate sono state prelevate in differenti luoghi:

- RAP A: un prodotto proveniente da lavori di ripristino di uno strato di base della SS3 in località Acqualagna (PU);
- RAP B: materiale prelevato in impianto;
- RAP C: materiale prelevato presso l'impianto di conglomerato INCOBIT (sito in Ancona)
 e successivamente vagliato in laboratorio per ottenere una frazione 16/20.

Per tutti e tre i fresati si è utilizza un Dmax 20 mm. Si riportano di seguito le caratteristiche dei RAP.

3.1.1 <u>RAP A</u>

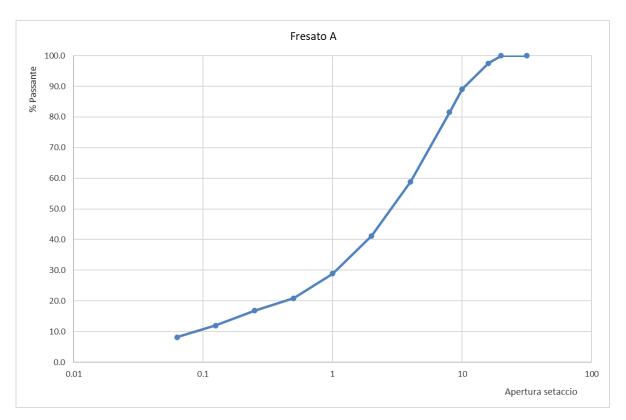


Fig. 3.1 - Curva granulometrica RAP A

_	
Campione	В
diametro	% passante
31.5	100
20	100
16	97.2
10	91.1
8	84.5
4	60.3
2	41.7
1	28.5
0.5	21
0.25	17.4
0.125	12.3
0.063	8.4

Tab. 3.1- Analisi granulometrica RAP A



Fig. 3.2 - RAP A

3.1.2 <u>RAP B</u>

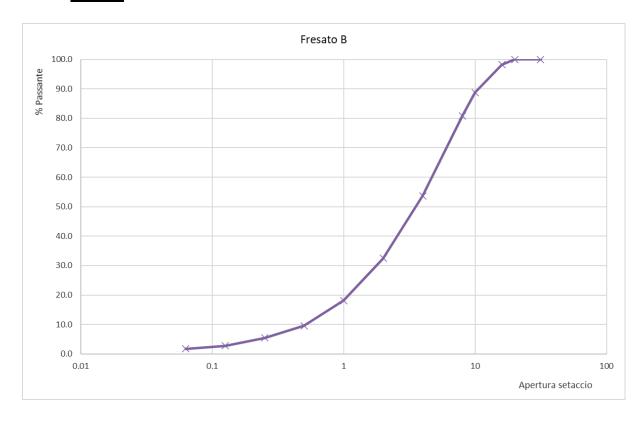


Fig. 3.3 - Curva granulometrica RAP B

Campione	В
diametro	% passante
31.5	100
20	100
16	98.2
10	88.7
8	80.8
4	53.7
2	32.5
1	18.1
0.5	9.6
0.25	5.5
0.125	2.8
0.063	1.8

Tab. 3.2 - Analisi granulometrica RAP B



Fig. 3.4 - RAP A

3.1.3 <u>RAP C</u>

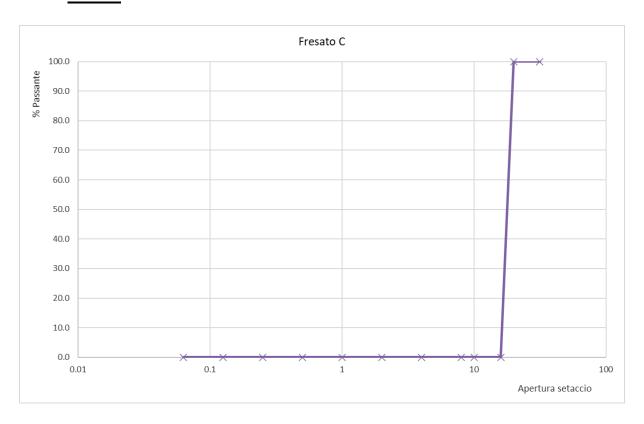


Fig. 3.5 - Curva granulometrica RAP C

Campione	С
diametro	% passante
31.5	100
20	100
16	0
10	0
8	0
4	0
2	0
1	0
0.5	0
0.25	0
0.125	0
0.063	0

Tab. 3.3 - Analisi granulometrica RAP C



3.2 Filler calcareo

Il filler è per definizione la frazione di aggregato avente dimensioni minori di 0,075 mm secondo la norma CNR 139 (la normativa UNI EN 933-1 invece richiede l'utilizzo del setaccio da 0,063 mm). Esso può essere di diverse tipologie, tra cui, polveri di lavorazione del calcare, polveri raccolte durante la produzione del conglomerato bituminoso in impianto, calce, cemento (non del tipo a presa rapida), e ceneri volanti. Il filler viene utilizzato nella produzione di conglomerati bituminosi per conferirgli una certa plasticità una volta unito al legante.



Fig. 3.7 - Filler calcareo

Campione:	Filler calcareo		
d [mm]	% passante		
31,5	100		
20	100		
16	100		
10	100		

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

Tab. 3.4 - analisi granulometrica filler calcareo

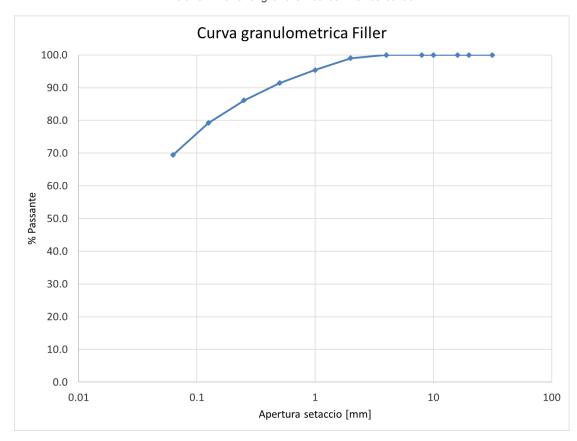


Fig. 3.8 - Curva granulometrica filler calcareo

3.3 Emulsioni Bituminose

Per la realizzazione delle miscele è stata utilizzata l'emulsione bituminosa modificata RIGEVAL CM dell'Azienza Valli Zabban.



Fig. 3.9 - Emulsione utilizzata durante la sperimentazione

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

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

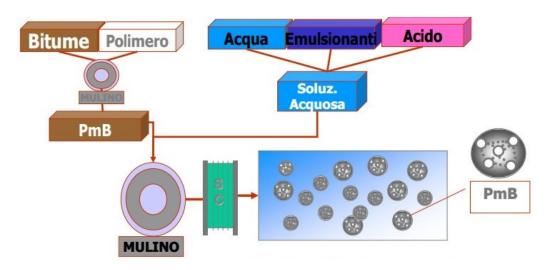


Fig. 3.10 - Schema produttivo emulsioni di bitume modificato

In tabella vengono riportate le caratteristiche fornite dall' azienda Valli Zabban. Il prodotto deve essere messo in opera a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C e lo stoccaggio deve avvenire a temperature comprese tra i 10°C e i 70°C. Nel caso in cui lo stoccaggio è prolungato senza movimentazione, si raccomanda di miscelare il prodotto per rimuovere l'eventuale sedimento e una volta all'anno è consigliata la pulizia del serbatoio di stoccaggio ed è sconsigliato agitare l'emulsione con agitatori a pale; si potrebbero avere problemi in presenza di gelo.

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

Fig. 3.11 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGEVAL CM

3.4 Cemento Portland

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

Nel riciclaggio a freddo il maggior legante idraulico utilizzato è il cemento Portland, d'alto forno o pozzolanico, con classe di resistenza 325.



Fig. 3.12 - cemento Portland 32,5 R

Il cemento Portland, il più importante dei leganti idraulici, è il prodotto che si ottiene dalla miscelazione del clinker, con l'aggiunta di gesso biidrato oppure, più raramente, di anidrite naturale. Il clinker è il componente base per la produzione del cemento: così chiamato dal nome del forno (kiln) in cui avviene il processo di cottura, è costituito da una miscela di argilla, calcare, sabbia, ceneri di pirite ed altri materiali (macinati, dosati e mescolati) cotta a circa 1300-1500°C. Per migliorare le caratteristiche del prodotto finito, al clinker viene aggiunto circa il 2% di gesso o di solfato di calcio e la miscela è finemente macinata.

Capitolo 4 - Test Methods e Programma Sperimentale

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

4.1 Obbiettivi

Lo scopo dell'analisi condotta riguarda lo studio delle caratteristiche meccaniche di diverse miscele preparate con determinate percentuali di filler. Per ogni tipo di miscela sono stati realizzati otto provini con maturazione in forno a 40°C a tre e quattordici giorni.

4.2 Apparecchiature e protocolli di prova

4.2.1 Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica consiste nella vagliatura del materiale, la quale, si effettua per mezzo di una serie di setacci disposti in ordine decrescente dall'alto verso il basso. I setacci possono essere a maglia circolare o maglia quadrata. Il diametro dei singoli granuli corrisponde rispettivamente al diametro della maglia circolare e alla diagonale della maglia quadrata. In particolare, per lo studio sono stati utilizzati setacci a maglia quadrata.



Fig. 4.1 - Setaccio a maglia quadrata

Sono stati utilizzati quattordici setacci, posti uno sopra l'altro per ordine crescente delle dimensioni delle maglie da 0,063 mm a 31,5 mm.



Fig. 4.2 - Pila di setacci

In figura viene illustrato il vibro-vaglio, utilizzato per l'analisi in cui sono messi i setacci; la macchina viene lasciata in azione per circa 10 minuti.



Fig. 4.3 - Pila di setacci posizionata nel vibro-vaglio

La pila è stata composta dai seguenti setacci:

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

Tab 4.1 - Apertura setacci per analisi granulometrica

L'analisi granulometrica consiste nel determinare alcune grandezze: quali trattenuto parziale, trattenuto cumulativo, passante parziale e passante cumulativo. Il trattenuto parziale è il rapporto tra la massa del materiale sull'i-esimo setaccio e la massa iniziale del campione (espressa in percentuale). Esso corrisponde al materiale che viene trattenuto sul setaccio; conseguentemente si può determinare il passante parziale (complementare del trattenuto parziale). Il trattenuto cumulativo, invece, è la somma di tutti i trattenuti parziali fino al setaccio i-esimo che si considera. Il passante cumulativo è il complementare del trattenuto cumulativo.

Campione		Α		
		% parz.	%	%
Setaccio/crivello	Trattenuti	trattenuto	trattenuto	passante
31.5	0	0.0	0.0	100.0
20	52.2	3.0	3.0	97.0
16	41.5	2.4	5.4	94.6
10	139.5	8.1	13.5	86.5
8	126.8	7.4	20.9	79.1
4	376	21.9	42.8	57.2
2	294.9	17.2	60.0	40.0
1	204.5	11.9	71.9	28.1
0.5	133.7	7.8	79.7	20.3
0.25	68.5	4.0	83.7	16.3
0.125	79	4.6	88.3	11.7
0.063	62.5	3.6	91.9	8.1
FONDO	135.9	7.9	99.8	0

Tab. 4.2 - Esempio di calcolo delle percentuali di passante

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

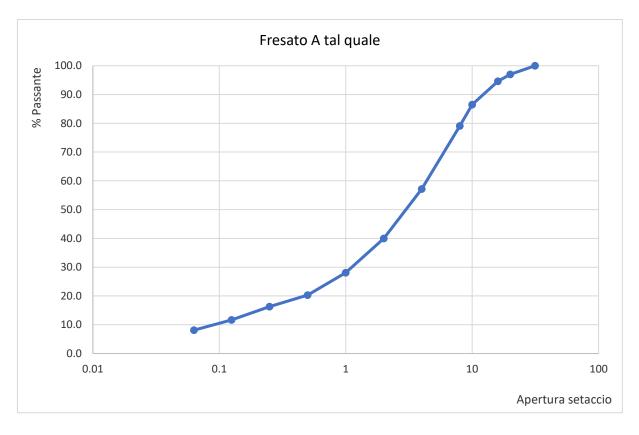


Fig. 4.4 - Esempio di curva granulometrica

4.2.2 Picnometro

Il picnometro è uno strumento in vetro utilizzato per determinare la densità di corpi liquidi e solidi. Tale strumento è stato usato per determinare le masse volumiche e l'assorbimento degli aggregati.



Fig. 4.5 - Picnometro

Prima di inserire il materiale all'interno del picnometro, è bene lavarlo con un setaccio 0,063 in modo da eliminare tutto il passante a tale diametro. Si procede riempiendo il picnometro con circa 0.6-0.7 kg di fresato (e si pesa M1), viene quindi inserita acqua al suo interno fino a sommergere completamente gli aggregati e si mette a condizionare in camera climatica a 20 °C per una notte (questo affinchè tutti gli aggregati assorbano acqua).

Il giorno successivo si eliminano le bolle d'aria rimaste intrappolate tra gli aggregati, per mezzo di una pompa per sottovuoto che agisce per circa 20 minuti



Fig. 4.6 - Picnometro collegato alla pompa per sottovuoto

Completata l'aspirazione delle bolle d'aria, il picnometro viene messo, insieme a delle bottiglie d'acqua, in camera climatica a 20°C per una notte. Il giorno successivo, il picnometro viene sottoposto nuovamente alla pompa per sottovuoto per altri 15 – 20 minuti.

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



Fig. 4.7 - Misura della massa M2

Si prende un termometro ad ago e si misura la temperatura dell'acqua T1 e si verifica che sia 22 ± 3 °C.



Figura 4.8 - Misura della temperatura T1

Successivamente, si recupera il fresato e lo si divide tramite un setaccio da 4 mm Da questo punto in poi la procedura si separa in due metodi diversi, uno per la pezzatura grossa e uno per la pezzatura fine.

4.2.2.1 Procedura per il calcolo dell'assorbimento aggregati 31.5-4 mm

Il contenuto del picnometro viene versato in un setaccio con apertura 4 mm, in modo da far defluire solo l'acqua. Il trattenuto viene posizionato su una teglia larga su cui è stato apposto un panno assorbente. Il materiale steso viene tamponato con un panno fino a raggiungere la condizione di superficie satura asciutta (SSA), ovvero l'aggregato deve essere umido ma non deve avere il film d'acqua sulla superficie.



Fig. 4.9 - Materiale in condizioni di superficie satura

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



Fig. 4.10 - Forno

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

4.2.2.2 Procedura per il calcolo dell'assorbimento aggregati 4-0.063 mm

Si pone nel lavandino il setaccio da 0,063 mm e anche in questo caso si fa scorrere l'acqua attraverso il setaccio per recuperare il materiale. Si versa il materiale all'interno di una teglia di alluminio precedentemente tarata, tara1, e la si pone nel forno a 40°C per 30 minuti circa per togliere l'acqua in eccesso. Anche in questo caso devo raggiungere la condizione di superficie satura come segue:

si prendono un cono una spatolina e un pistone per battere e si pesano insieme alla teglia così da avere la tara; dopo ogni intervallo di tempo, la teglia viene tolta dal forno e viene inserito un po' di materiale all'interno del cono, dopo, tramite il pistone si danno 25 colpi sul materiale e togliendo il cono si valuta la condizione dell'aggregato; si deve ripete la procedura fino a raggiungere la condizione di superficie satura come in figura

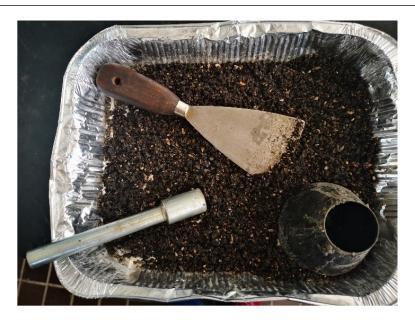


Fig. 4.11 - Teglia con materiale, spatola, pistone e cono

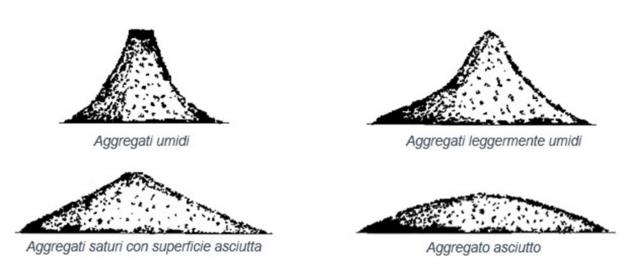


Fig. 4.12 Possibili configurazioni del materiale dopo la rimozione del cono

Una volta raggiunta la condizione di superficie satura, la teglia con tutti gli utensili viene pesata e sottraendo la tara si ottiene M1; successivamente la teglia viene rimessa in forno e dopo un giorno viene pesata nuovamente, (si fanno due pesate per vedere che la massa rimane costante) ottenendo M4. Anche in questo caso, il picnometro viene riempito di acqua fino al menisco e misura la massa M3 e la temperatura che non deve variare più di 2°C da T1.

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

Massa volumica apparente dei granuli

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

• Massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa

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

Massa volumica dei granuli in condizioni di SSA

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

Assorbimento dell'acqua

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

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

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m ³	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m³
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tab. 4.3 - Massa volumica dell'acqua in funzione della temperatura

4.2.3 Preparazione dei provini

La preparazione dei provini è stata effettuata in 2 fasi:

• Fase 1: Preparazione degli aggregati

Questa fase deve avvenire almeno 12 ore prima della fase successiva in quanto gli aggregati devono poter assorbire una parte dell'acqua totale della miscela (e cioè l'acqua d'assorbimento); Per avere un maggiore controllo sull'umidità essi vanno inseriti in forno a 40°C, fino al raggiungimento della massa costante e quindi alla completa asciugatura.

In base al mix design scelto, si stabiliscono i dosaggi in peso, ovvero la comunemente detta *ricetta*, di: aggregati, filler, acqua, emulsione bituminosa e cemento.



Fig. 4.13 - Dosaggio degli aggregati secondo la ricetta stabilita

A titolo di esempio viene riportato un esempio di ricetta:

Column	1	2	3
ID	Name Dosage		Dosage
		oven-dried	air-dried
		aggregates	aggregates
		[g]	[g]
RA1	В	7549	7549
RA2	Α	7214	7214
VA1	С	6988	6988
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	omya	453	453
Water (abs)		404.5	404.5
Cement	C1-ref	444	444
Emulsion		888	888
Water di aggiunta		350	350
TOTAL		24292	24292
Total for each specimen		2841.1	2841.1

Tab. 4.3 - Esempio di ricetta per la preparazione di un impasto

Questa fase 1 viene completata all'interno di secchi di plastica: si posizionano gli aggregati nel secchio di plastica e si immette l'acqua di assorbimento (Water abs), sempre secondo le quantità stabilite dalla ricetta. Fatto ciò, il materiale viene miscelato manualmente e poi il secchio viene sigillato con un telo di plastica per evitare la perdita di acqua.



Fig. 4.14 - Secchio di plastica sigillato

Fase 2: Miscelazione

Il giorno seguente come prime operazioni vengono pesati cemento e acqua di aggiunta secondo ricetta e si mescola bene l'emulsione bituminosa per assicurarsi che bitume e acqua non siano separati. Dopo queste operazioni preliminari, si passa alla miscelazione che prevede la seguente procedura:

Gli aggregati vengono trasferiti dal recipiente di plastica al miscelatore.



Fig. 4.15 - Miscelatore meccanico



Fig. 4.16 - Aggregati versati nel miscelatore

Insieme agli aggregati si versa anche il filler.



Fig. 4.17 - Aggregati e filler nel miscelatore

Si aziona il miscelatore per 1 minuto.

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



Fig. 4.18 - Cemento nel miscelatore

- 2) Si versa la seconda metà del cemento e si ripete la miscelazione per 1 minuto.
- 3) Si aggiunge metà dell'acqua e si aziona il miscelatore per 1 minuto. A fine miscelazione meccanica si procede con una miscelazione manuale.



Fig. 4.19 - Aggiunta dell'acqua

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



Fig. 4.20 - Dosaggio dell'emulsione bituminosa



Fig. 4.21 - Emulsione bituminosa nel miscelatore

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



Fig. 4.22 - Miscela di Riciclaggio a Freddo ultimata

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

Il confezionamento dei provini è stato realizzato mediante la pressa a taglio giratoria. Essa 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. La buona corrispondenza con la realtà è dovuta al fatto che durante la compattazione con tale apparecchiatura il conglomerato subisce una continua riorganizzazione interna dei suoi costituenti che lo porta, in analogia a quanto avviene in cantiere, ad assumere configurazioni corrispondenti a strutture via via più dense. Tale evoluzione è dovuta alla rotazione della fustella da 150 mm di diametro, 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°. 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; aumentando il numero dei giri, l'altezza del materiale contenuto nella fustella tenderà a diminuire e parallelamente la densità aumenterà fino ad un valore massimo caratteristico del materiale stesso. Come illustrato dalla figura 4.25, l'apparecchiatura è composta da vari elementi, tra cui un telaio di carico costituito da un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella; un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale; una base rotante e infine un sistema di acquisizione e controllo dei dati in cui viene registrato l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro.

Componenti Misura altezza Controllo ed acquisizione dati Telaio di carico Supporto inclinabile Base rotante

Fig. 4.23 schema pressa giratoria

A questo punto 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, impostando sulla schermata principale, 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.



Fig. 4.24 - Schermata iniziale del software



Fig. 4.25 - Schermata principale pressa a taglio giratoria

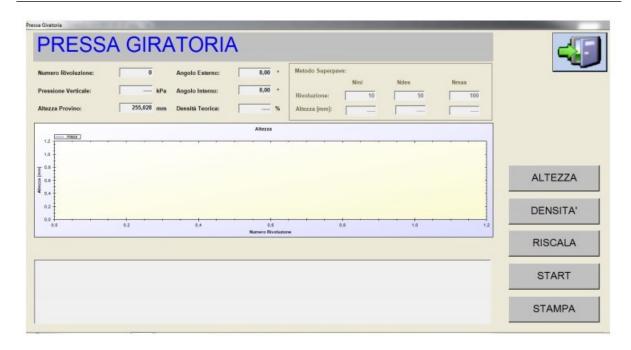


Fig. 4.26 - Schermata di avvio prova

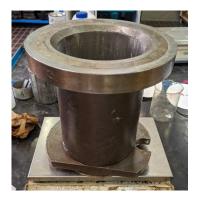


Fig. 4.27 - Fustella con diametro 150 mm

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

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



Fig. 4.28 - Riciclato a freddo inserito nella fustella

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



Fig. 4.4 - Lubrificazione del piano di appoggio

Eseguita questa fase la fustella può essere inserita nella macchina.



Fig. 4.30 - Inserimento della fustella nella macchina

Ha inizio la prova: il pistone scende e applica la pressione assiale; la fustella viene inclinata di 1,25° e inizia a ruotare attorno al proprio asse a velocità costante. Ultimato il numero di rivoluzioni il pistone sale ed è possibile estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.



Fig. 4.31 - Prova in esecuzione

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



Fig. 4.5 - Estrazione del provino

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

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

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

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

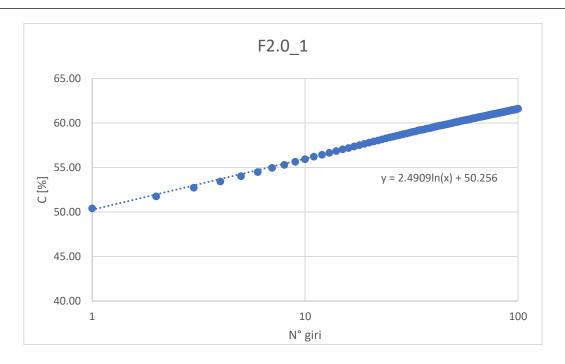


Fig. 4.6 - Esempio di curva (n° giri; C) e relativa interpolazione con equazione della retta

L'intercetta all'asse delle ordinate, indicata come \mathcal{C}_1 , rappresenta il grado di addensamento iniziale mentre la pendenza, indicata come k, rappresenta la lavorabilità, ovvero quanto viene compattato il materiale. Più è alta k più il materiale di compatta bene.

Provini	C ₁	k	
	[mm]	[/]	
1	50.05	2.48	
2	73.31	3.51	
3	72.53	3.61	
4	72.26	3.61	
5	71.86	3.66	
6	70.72	3.83	
7	70.72	3.83	
8	70.72	3.83	
	68.455	3.452	

Tab. 4.5 - Esempio di riepilogo dei coefficienti C1 e k nei provini di un impasto

Vengono inoltre annotate le seguenti masse:

- Massa della fustella: tara₁
- Massa del disco di carta-filtro: tara₂
- ullet Massa di fustella, disco e materiale PRE compattazione: m_1

• Massa di fustella, disco e materiale POST compattazione: m_2

4.2.5 <u>Determinazione delle proprietà volumetriche</u>

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

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

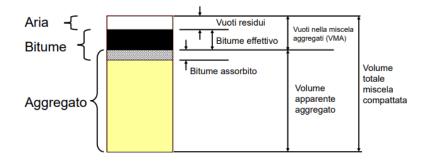


Fig. 4.7 - Schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

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

4.2.5.1 <u>Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5)</u>

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:

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

dove:

- ρ_m : massa volumica massima della miscela in kg/m3;
- p_a : percentuale di aggregati i-esimi nella miscela in m/m;

- ρ_a : massa volumica apparente degli aggregati i-esimi 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.

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

Si definisce massa volumica apparente la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di provino ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica apparente 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 (m₁). La massa volumica geometrica (p_{bgeom}) per provini cilindrici si calcola come segue:

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

dove:

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

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

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

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

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

Per la determinazione del modulo di rigidezza del conglomerato realizzato per la presente tesi, si è fatto ricorso ad un'apparecchiatura denominata Nottingham Asphalt Tester (NAT), le cui componenti sono:

- telaio di carico;
- unità pneumatica;
- sistema di controllo ed acquisizione dati;
- cella climatica per il controllo della temperatura.

In figura è ben visibile la macchina NAT disponibile presso il laboratorio strade e trasporti dell'Università Politecnica delle Marche, con evidenziate le sue parti principali.



Fig. 4.35 - Nottingham Asphalt Tester

L'unità pneumatica è collegata ad un compressore che fornisce aria secca e pulita ad almeno 7 bar di pressione. Il condizionamento dei provini è effettuato lasciando gli stessi all'interno della camera climatica per circa 24 ore, in modo da raggiungere una temperatura uniforme nel volume della miscela.

Il telaio di carico è costituito da una base, due montanti, una trave di contrasto regolabile e da un attuatore pneumatico collegato ad un pistone per consentire l'applicazione dei carichi verticali. Una cella di carico, a sua volta collegata al pistone, trasmette le misure all'unità di controllo ed acquisizione dati.

La forma dell'impulso di carico, descritta da un parametro denominato "rise time" (tempo di picco), dipende dal controllo operato in continuo dalla cella di carico e dalla compressibilità dell'aria presente all'interno dell'attuatore pneumatico. Quest'ultimo, tramite il pistone, consente l'applicazione di forze verticali fino a 20 kN in condizioni statiche e 16 kN in condizioni dinamiche. L'unità di acquisizione dati è composta da sei moduli assemblati, i quali forniscono energia elettrica agli organi di controllo e misura del NAT, permettendo di gestire la prova direttamente dal personal computer.

La determinazione del modulo di rigidezza con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di $90^{\circ} \pm 2^{\circ}$).

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare in maniera automatica tutte le variabili in gioco: il tempo di picco, il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso 3 µm) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova. Il controllo di tali grandezze avviene tramite un sistema di gestione che opera in maniera da effettuare 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.

Le specifiche condizioni di prova rendono lecita l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo.

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. In figura è riportato lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il provino durante la prova di trazione indiretta.

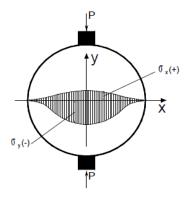


Fig. 4.36 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

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

$$\begin{split} \sigma_{x,max} &= \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} & \sigma_{x,media} &= \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t} \\ \sigma_{y,max} &= \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} & \sigma_{y,media} &= \frac{-P}{d \cdot t} \end{split}$$

dove:

P è il carico applicato;

d è il diametro del campione;

t è lo spessore del campione.

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

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

in cui:

ν è il coefficiente di Poisson;

E è il modulo elastico del materiale.

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

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

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

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0.273 + \nu)$$

La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del *rise-time* per il carico di picco non sia pari a 0.60 ± 0.10 , viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

$$E' = E[1 - 0.322(\log(E) - 1.82)(0.60 - k)]$$

dove:

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

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

Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $3,0\pm 0,2$ μm . Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- **temperatura**: influisce in maniera significativa sulla vita utile del conglomerato; 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 come mostra la figura 4.40 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 con il tempo di picco è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot r_{\rm i}}$$

dove:

r_i è il *rise-time* espresso in ms;

f è la frequenza espressa in Hz.

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

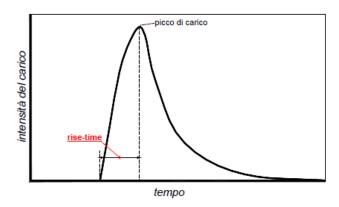


Fig. 4.37 - Rise-time durante una prova di modulo eseguita con il NAT

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

Dopo aver eseguito il condizionamento dei provini alla temperatura selezionata all'interno della camera climatica, il provino viene alloggiato nell'apposito telaio, costituito da:

 telaio principale: ha la funzione di sostenere il provino e risulta costituito da una base sulla quale è posizionato un sistema di barre a V che, nella posizione rialzata, danno sostegno al campione. Sul telaio sono, inoltre, presenti due aste verticali che fungono da guida per la barra di carico superiore, come mostra la figura 4.41

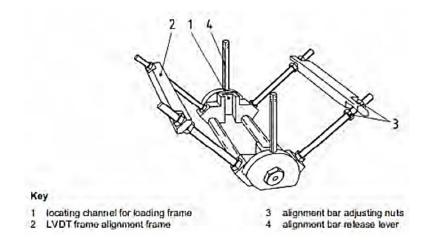


Fig. 4.38 - Telaio principale

Telaio porta trasduttori: consente di sorreggere i trasduttori di spostamento, i quali
vengono posizionati in corrispondenza del diametro orizzontale perpendicolarmente
alla direzione di applicazione del carico e servono a misurare l'elongazione massima
istantanea. La misura viene effettuata mediante due trasduttori di spostamento LVDT
(Linear Variable Diffrential Transducer). Il supporto rigido è munito di quattro morsetti
a vite che servono per ancorarlo, rendendolo solidale, al provino, come in figura 4.42.

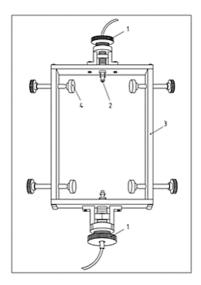


Fig. 4.39 Listello per il posizionamento dei trasduttori per la misura dello spostamento orizzontale: 1) regolatore LVDT; 2) LVDT; 3) viti di fissaggio del provino; 4) telaio di supporto per gli LVDT

 Barra di carico superiore: tale elemento si inserisce lungo le guide verticali del telaio principale allo scopo di contrastare diametralmente il provino. Una semisfera di acciaio, appoggiata sull'apposito alloggio, ne completa l'allestimento.

Una volta allestito, il castelletto si presenta come in figura, pronto per l'alloggiamento del provino da testare.



Fig. 4.40 - Provino posizione nel castelletto

Tutti i parametri di prova vengono controllati grazie ad un apposito software (Indirect Tensile Stiffness Modulus) che consente di eseguire la fase di input mediante una specifica finestra di dialogo, in cui figurano la temperatura, il diametro dei provini, la sua altezza, il coefficiente di Poisson, il rise-time, il valore della deformazione orizzontale ed il numero di colpi di precarico.

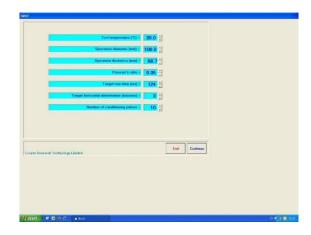


Fig. 4.41 - Schermata per introdurre i parametri della prova

Successivamente, il programma mostra alcuni passaggi in cui vengono spiegate le operazioni da eseguire per il corretto posizionamento del provino nella macchina, nonché il corretto posizionamento dell'attuatore di carico, il quale, attraverso il comando "Make contact", deve appoggiare perfettamente sulla semisfera alloggiata sopra la barra di carico.

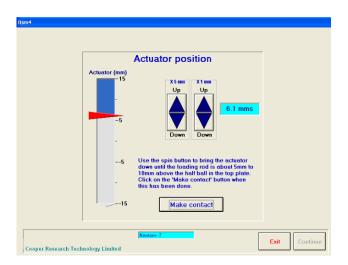


Fig. 4.42 - Make contact dell'attuatore con il provino

Quando il pistone giunge a contatto con il provino, si posizionano i due trasduttori differenziali variabili lineari (LVDTs) laterali in modo tale che appoggiano sul diametro orizzontale del provino. Questi permettono di rilevare la deformazione laterale del provino una volta soggetto al carico assiale centrale. Per un perfetto posizionamento, si ricorre all'ausilio della finestra

del software di Figura 4.46: quando i trasduttori si trovano nel range di validità, le frecce che compaiono sul monitor del pc si colorano di rosso.

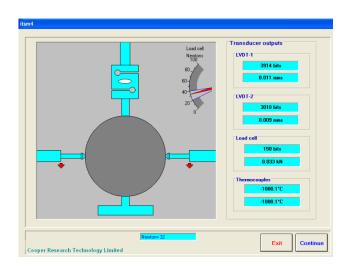


Fig. 4.43 - Schermata per il corretto posizionamento dei trasduttori



Fig. 4.44 - provino all'interno del NAT

A questo punto il software è pronto per imprimere i 10 colpi di precarico impostati in modo tale che il software riconosce e assesta il campione aggiustando quindi il livello di carico. Nel pannello di controllo viene evidenziato in celeste l'onda di deformazione, mentre, in rosso la curva di carico,

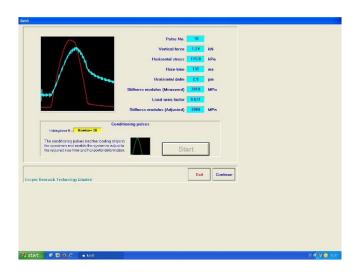


Fig. 4.45 - schermata degli impulsi di condizionamento

Ultimata la fase di precondizionamento, si prosegue con la schermata successiva, ovvero quella relativa al vero e proprio test per il calcolo della rigidezza. Il software calcola direttamente la media della rigidezza derivante dai 5 impulsi.

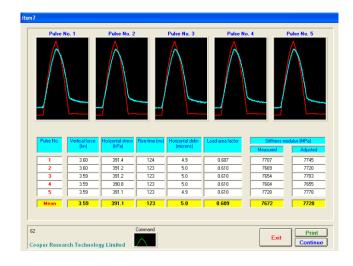


Fig. 4.46 - Esecuzione della prova per la determinazione del modulo di rigidezza

Come si può osservare, ad ogni pulsazione vengono forniti una serie di dati, ovvero:

- la forza verticale applicata;
- la tensione orizzontale;
- il rise time:
- la deformazione orizzontale;
- il fattore dell'area di carico;

il modulo di rigidezza misurato e quello aggiustato

Determinato il primo valore del modulo E del conglomerato, la prova viene ripetuta per lo stesso provino sul diametro opposto, ruotando il campione di 90°. Il valore medio del modulo di rigidezza ottenuto dalle due misurazioni sarà il risultato finale, e sarà accettato solamente se il valore ottenuto dalla prova effettuata sul secondo diametro non si discosta più del 10% o meno del 20% rispetto al valore ottenuto dalla prova effettuata lungo il primo diametro. In caso contrario, il risultato deve essere scartato e si effettua di nuovo la prova dopo alcuni minuti.

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

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova Brasiliana, rappresenta un primo passo per superare le limitazioni di natura empirica proprie della prova Marshall. La prova consiste nel comprimere, fino a rottura, un provino lungo un piano diametrale verticale. La rottura del materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson).

L'apparecchiatura che si utilizza per la prova Brasiliana è costituita da un sistema di carico con due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti,

la testa di carico superiore. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

• larghezza: 15±2 mm;

spessore: 4±1 mm;

lunghezza ≥ della lunghezza della linea di contatto del provino.

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. In questa indagine, e di norma, la prova è effettuata alla temperatura di 25°C. Infatti, prima della realizzazione della prova, i provini vengono tenuti per almeno 3 ore nella camera climatica a 25°C rappresentata in Figura 4.50.



Fig. 4.47 - Camera climatica a 25°C

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

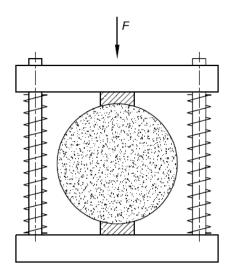


Fig. 4.48 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

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) subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso. I valori misurati sono visibili nel computer usato per azionare il macchinario. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione.

In Figura 4.52 si trova invece un provino rotto al termine della prova Brasiliana.



Fig. 4.49 - Provino rotto dopo la prova

La macchina di prova può essere guidata mediante un pannello di controllo oppure in remoto con un computer tramite il software UTMII. Nel controllo in remoto, si impostano parametri di prova (i principali sono diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova) e si ottengono in output:

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

Si può chiedere al software di fornire già calcolati anche la resistenza a trazione indiretta ITS e il coefficiente di trazione indiretta ITC. Nelle figure seguenti si possono vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II.

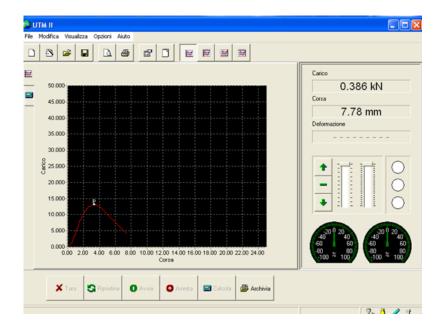


Figura 4.50 - Curva sforzo-deformazione risultante dall'applicazione del carico assiale



Fig. 4.51 - Schermata con rielaborazione dei risultati

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

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

dove:

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



Fig. 4.52 - Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

Successivamente, si determina il coefficiente di trazione indiretta CTI (Indirect Tensile Coefficient) con la seguente equazione:

$$\cdot CTI = \pi * d * ITS2 * Dt$$

dove Dt è la deformazione verticale a rottura in mm.

Noti tutti i punti deformazione verticale-carico della prova, è possibile ricostruire la curva di carico e calcolare l'energia di frattura, come area sottesa da tale curva.

4.3 **Programma Sperimentale**

Lo scopo dell'analisi condotta riguarda lo studio delle caratteristiche meccaniche di diverse miscele preparate con percentuali variabili di filler. Lo studio si è sviluppato in due fasi: una prima fase di studio preliminare per determinare la miscela ottimale degli aggregati e una seconda fase in cui sono state realizzate cinque diverse miscele di riciclato a freddo facendo variare la percentuale di filler.

4.3.1 Fase preliminare

Il RAP A e B prelevati in cantiere e il RAP C prelevato in impianto sono stati portati al Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria di Ancona. Dopo aver studiato le caratteristiche dei materiali, è risultato che i singoli fresati non soddisfano singolarmente i requisiti del capitolato (Bolzano) usato per questa sperimentazione; quindi, si è deciso di miscelarli per raggiungere tale obbiettivo.

Capitolato BZ			
Setaccio/crivello	MIN	MAX	MEDIA
80	100	100	100
63	95	100	97.5
40	85	100	92.5
22.5	70	95	82.5
10	50	75	62.5
4	30	42	36
2	20	35	27.5
0.5	10	18	14
0.063	4	8	6

Tab. 4.6 – Passanti setacci capitolato Bolzano

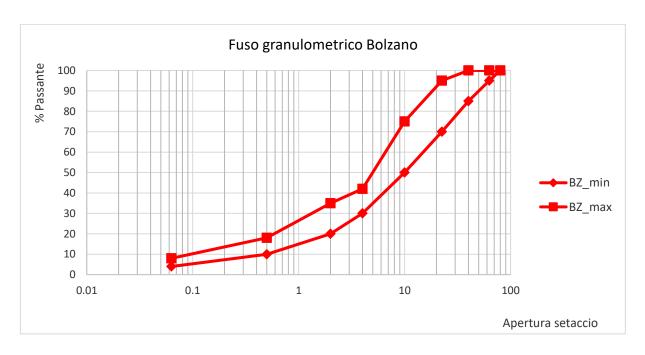


Fig. 4.53 – Fuso granulometrico capitolato

4.3.1.1 <u>Classificazione del materiale</u>

In questa fase preliminare sono stati uniti i tre RAP (A, B, C), in differenti percentuali, con il 3.5% di filler; il risultato è la curva granulometrica mostrata in figura 4.57.

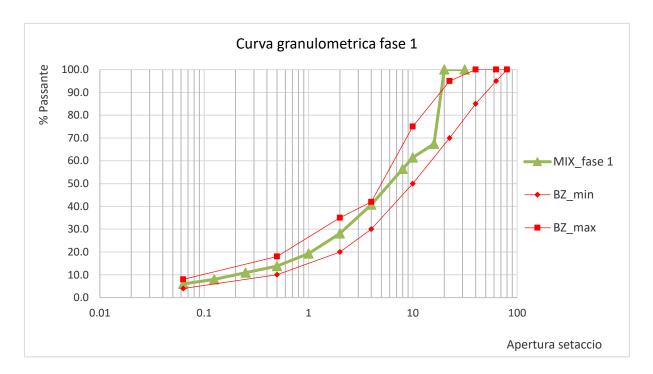


Fig. 4.54 – curva granulometrica MIX fase 1 e fuso di capitolato

A partire da questa curva sono state ricavate le cinque miscele utilizzate in questa sperimetnazione.

Per il calcolo delle altre ricette, partendo dalla precedente soluzione con il 3,5% di filler; è stato eliminato il filler in modo da arrivare alla percentuale desiderata. Successivamente è stata aggiunta una quotaparte di materiale per ogni frazione. In questo calcolo non è considerato il cemento, il quale viene aggiunto dopo nelle ricette dei vari impasti. Questo poiché il cemento è considerata un aggiunta in fase di miscelazione e teoricamente non

dovrebbe influenzare la granulometria della miscela (poiché esso reagisce con l'acqua e forma pasta cementizia).

4.3.1.2 Elaborazione dei dati del picnometro

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

- M1: massa del picnometro + aggregato + acqua fino al menisco
- M2: massa del picnometro pieno d'acqua (la temperatura dell'acqua non deve differire di 2°C da T1)
- M3: massa netta dell'aggregato asciutto post essiccazione nel forno
- T1: temperatura dell'acqua in corrispondenza della pesata per M1 (22°C±3°C) dell'acqua a T1

Da cui poi si è stati in grado di calcolare:

• ρ a: massa volumica apparente dei granuli

Di seguito vengono riportati i risultati:

RAP A

M1 [g]	3630.7
M2 [g]	3249.7
M3 [g]	618.7
T1 [°C]	24.0
ρw [g/cm3]	0.9974

ρA [g/cm3] 2.596093

T1	24
Tinf	24
pwinf [g/cm3]	997.4
Tsup	24
pwsup [g/cm3]	997.4
ρw [g/cm3]	997.40

Tab. 4.7 - Elaborazione picnometro RAP A

RAP B

M1 [g]	3641.1
M2 [g]	3249.7
M3 [g]	650.3
T1 [°C]	23.7
ρw	
[g/cm3]	0.99746

|--|

T1	23.7	
Tinf	23	
pwinf [g/cm3]	997.6	
Tsup	24	
pwsup [g/cm3]	997.4	
ρw [g/cm3]	997.46	

Tab. 4.8 - Elaborazione picnometro RAP B

• RAP C

M1 [g]	3764.3
M2 [g]	3249.7
M3 [g]	843.5
T1 [°C]	23.0
ρw [g/cm3]	0.9976

ρΑ [g/cm3]	2.558454

T1	23
Tinf	23
ρwinf [g/cm3]	997.6
Tsup	23
ρwsup [g/cm3]	997.4
ρw [g/cm3]	997.60

Tab. 4.9 - Elaborazione picnometro RAP C

	RAP A	RAP B	RAP C
ρΑ [g/cm3]	2.596	2.505	2.558
WA24 (%)	1.5	2.1	2.0

Tab. 4.10 – Assorbimento percentuale acqua

4.3.1.3 Miscele di prova

Come già anticipato nei precedenti paragrafi sono state create cinque miscele al variare della percentuale di filler di seguito verranno illustrate le ricette finali con la quantità di cemento (2.0%) ed emulsione bituminosa (4%) e le curve granulometriche per ognuna di esse.

4.3.1.3.1 F0%

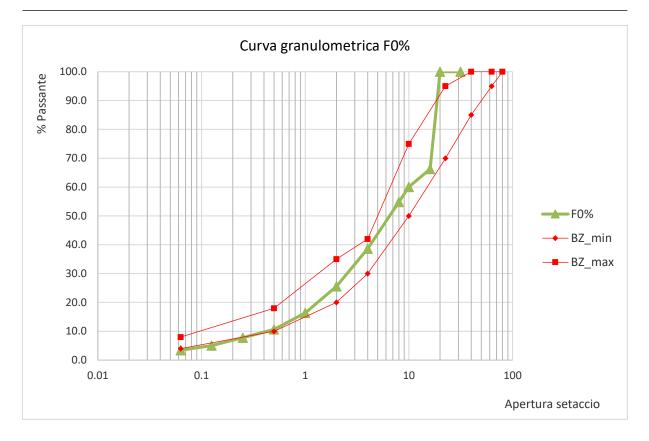


Fig. 4.55 – curva granulometrica miscela F0% e fuso di capitolato

Column	1	2	3
ID	Name	Dosage	Dosage
		oven-dried	air-dried
		aggregates	aggregates
		[g]	[g]
RA1	RAP B	7750	7750
RA2	RAP A	7415	7415
VA1	RAP C	7169	7169
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	omya	0	0
Water (abs)		415.3	415.3
Cement	C1-ref	447	447
Emulsion		893	893
Water di aggiunta		344	344
TOTAL		24434	24434
total for each specimer	1	2841.1	2841.1

Tab. 4.11 – Ricetta miscela F0%

4.3.1.3.2 F2.0%

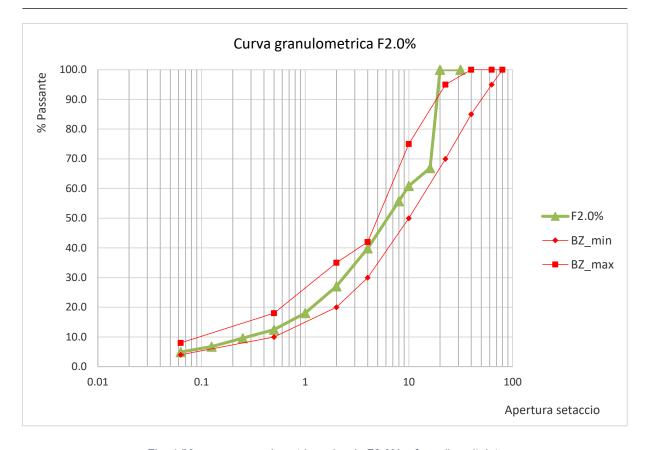


Fig. 4.56 – curva granulometrica miscela F2.0% e fuso di capitolato

Column	1	2	3
ID	Name	Dosage	Dosage
		oven-dried	air-dried
		aggregates	aggregates
		[g]	[g]
RA1	RAP B	7549	7549
RA2	RAP A	7214	7214
VA1	RAP C	6988	6988
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	omya	453	453
Water (abs)		404.5	404.5
Cement	C1-ref	444	444
Emulsion		888	888
Water di aggiunta		350	350
TOTAL		24292	24292
total for each specimen		2841.1	2841.1

Tab. 4.12 – Ricetta miscela F2.0%

4.3.1.3.3 F3.5%

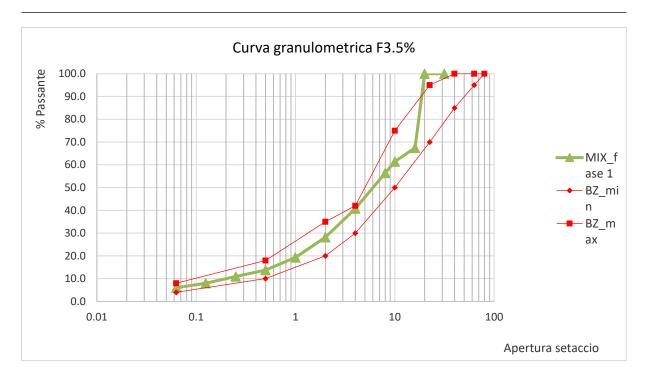


Fig. 4.57 – curva granulometrica miscela F3.5% e fuso di capitolato

Column	1	2	3
ID	Name	Dosage	Dosage
		oven-dried	air-dried
		aggregates	aggregates
		[g]	[g]
RA1	RAP B	7423	7423
RA2	RAP A	7105	7105
VA1	RAP C	6883	6883
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	omya	793	793
Water (abs)		398.2	398.2
Cement	C1-ref	444	444
Emulsion		888	888
Water di aggiunta		357	357
TOTAL		24292	24292
total for each specimen		2841.2	2841.2

Tab. 4.13 – Ricetta miscela F3.5%

4.3.1.3.4 F5.0%

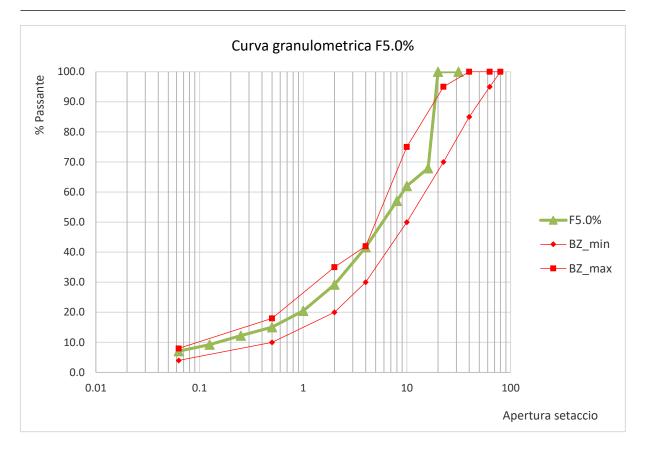


Fig. 4.58 – curva granulometrica miscela F0% e fuso di capitolato

Column	1	2	3
ID	Name	Dosage	Dosage
		oven-dried	air-dried
		aggregates	aggregates
		[g]	[g]
RA1	RAP B	7316	7316
RA2	RAP A	6983	6983
VA1	RAP C	6772	6772
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	omya	1133	1133
Water (abs)	_	391.8	391.8
Cement	C1-ref	444	444
Emulsion		888	888
Water di aggiunta		363	363
TOTAL		24292	24292
total for each specimen		2841.2	2841.2

Tab. 4.14 – Ricetta miscela F5.0%

4.3.1.3.5 F6.5%

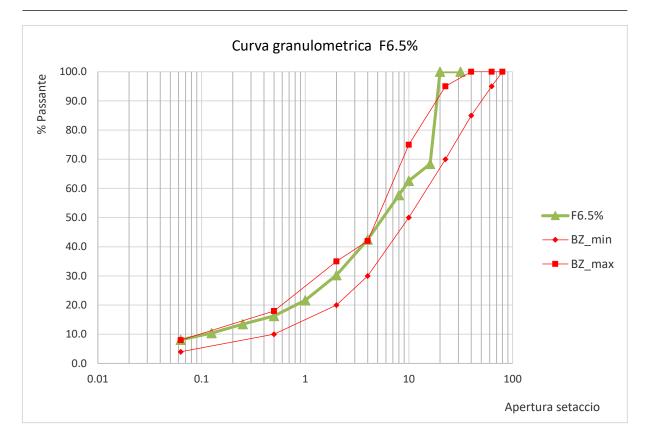


Fig. 4.59 – curva granulometrica miscela F6.5% e fuso di capitolato

Column	1	2	3
ID	Name	Dosage	Dosage
		oven-dried	air-dried
		aggregates	aggregates
		[g]	[g]
RA1	RAP B	7183	7183
RA2	RAP A	6888	6888
VA1	RAP C	6661	6661
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	omya	1473	1473
Water (abs)		385.6	385.6
Cement	C1-ref	444	444
Emulsion		888	888
Water di aggiunta		369	369
TOTAL		24292	24292
total for each specimen		2841.2	2841.2

Tab. 4.15 – Ricetta miscela F6.5%

4.3.2 Seconda fase

L'obiettivo di questa seconda fase è stato quello di caratterizzare e confrontare a livello prestazionale le cinque miscele di conglomerati riciclati a freddo in cui è stata fatta variare esclusivamente la percentuale di filler.

4.3.2.1 <u>Codifica provini</u>

Per ogni famiglia sono stati realizzati più impasti, identificati, in base alla percentuale di filler, con la lettera F(filler) seguita dalla percentuale utilizza e il numero di provino.

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

- N. 4 provini costipati con pressa giratoria imponendo un numero fisso di giri pari a 100 mm maturati a 3 giorni;
- N. 4 provini costipati con pressa giratoria imponendo un numero fisso di giri pari a 100 maturati a 14 giorni.



Fig. 4.60 - Provini

In base al valore della massa volumica massima ρ_m (Paragrafo 4.1.5), ed impostando una percentuale di vuoti voluta del 10%, si determina la massa della miscela necessaria per la realizzazione di un singolo provino un determinato tenore di vuoti.

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

- Lettera F riferita alla sperimentazione sul filler;
- Numero in % indicante la quantità di filler utilizzata;

• Numeri da 1 a 8 per indicare cronologicamente il provino;

Quindi ad esempio il nome F2.0_1 indica il primo provino (1) realizzato nell'impasto con percentuale di filler uguale al 2% (2.0).

Sui provini sono state realizzate prove di:

- Calcolo dei parametri di lavorabilità in fase di compattazione;
- Calcolo dell'umidità a 0, 3, 7, 14 giorni;
- Modulo di rigidezza a trazione indiretta ITSM dopo 3, 14 giorni
- Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 3, 14 giorni.

Capitolo 5 - Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui provini delle cinque famiglie di conglomerato bituminoso riciclato a freddo studiate.

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

In base ai dati ottenuti si è eseguito uno studio preliminare per determinare la miscela ottimale miscelando i diversi materiali. Si è definita quindi la miscela definitiva [Paragrafo 4.2.2] e sono stati confezionati i provini per le cinque diverse percentuali di filler.

I provini sono stati compattati con la pressa a taglio giratoria e sono stati posizionati in camera climatica a 40°C per tre e quattordici giorni.

Di seguito sono riportati i risultati di tutti i test eseguiti sui provini, suddivisi per le 5 famiglie di filler, secondo il seguente ordine:

- curve di compattazione e parametri di lavorabilità;
- perdita di acqua;
- prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS);
- coefficiente di trazione indiretta CTI.

Di seguito vengono riportati i nomi dei provini, classificati in base alla percentuale di filler utilizzato:

	Percentuale filler						
N° provino	0%	2.0%	3.5%	5.0%	6.5%		
1	F0_1	F2.0_1	F3.5_1	F5.0_1	F6.5_1		
2	F0_2	F2.0_2	F3.5_2	F5.0_2	F6.5_2		
3	F0_3	F2.0_3	F3.5_3	F5.0_3	F6.5_3		
4	F0_4	F2.0_4	F3.5_4	F5.0_4	F6.5_4		
5	F0_5	F2.0_5	F3.5_5	F5.0_5	F6.5_5		
6	F0_6	F2.0_6	F3.5_6	F5.0_6	F6.5_6		
7	F0_7	F2.0_7	F3.5_7	F5.0_7	F6.5_7		
8	F0_8	F2.0_8	F3.5_8	F5.0_8	F6.5_8		

Tab 5.1 – Classificazione provini

La maturazione in camera climatica a 40° C° è stata suddivisa in:

- 3 giorni per i provini con numero dispari (1,3,5,7)
- 14 giorni per i provini con numero pari (2,4,6,8)

5.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità

Le curve di compattazione sono state ricavate dai dati ottenuti durante la compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria. Sono stati inoltre eseguiti i calcoli dei parametri di lavorabilità, precedentemente descritti al paragrafo 4.2.4.

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

5.1.1 <u>Impasto F0%</u>

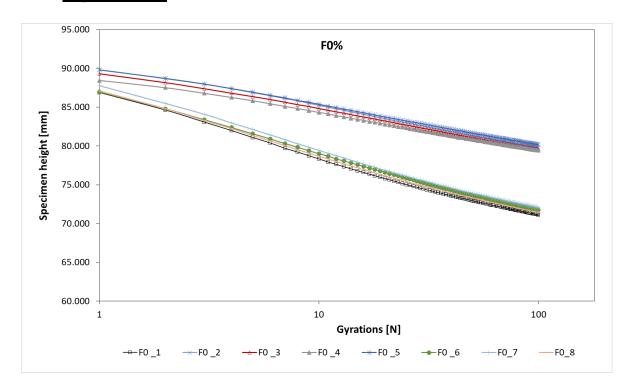


Fig. 5.1 - Curve di compattazione provini dell'impasto F0%

Provino	C ₁	k
PTOVITIO	[mm]	[/]
1	50.05	2.48
2	47.95	1.45
3	48.28	1.41
4	48.76	1.33
5	48.02	1.38
6	49.76	2.41
7	49.40	2.44
8	49.86	2.47
media	48.804	1.744

Tab. 5.2 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto F0%

5.1.2 *Impasto F2.0*

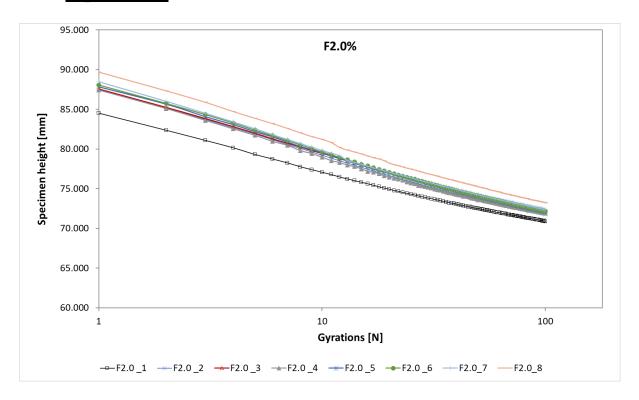


Fig. 5.2 - Curve di compattazione provini dell'impasto F2.0%

Provino	C ₁	k ra	
	[mm]	[/]	
1	51.84	2.18	
2	49.74	3.51	
3	49.73	2.37	
4	49.99	2.41	
5	49.58	2.45	
6	49.39	2.47	
7	49.35	2.46	
8	48.42	2.50	
media	50.045	2.567	

Tab. 5.3 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto F2.0%

5.1.3 *Impasto F3.5*

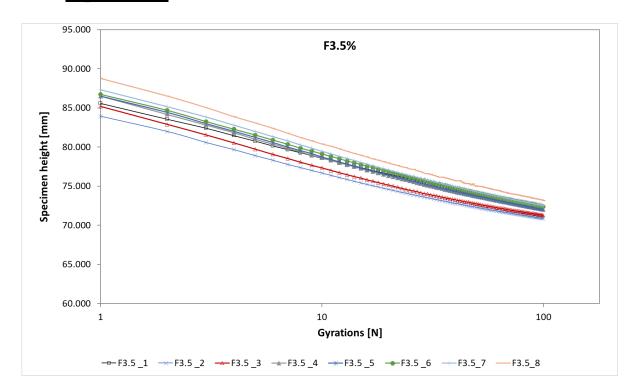


Fig. 5.3 - Curve di compattazione provini dell'impasto F3.5%

Provino	C ₁	k	
PIOVIIIO	[mm]	[/]	
1	51.12	2.18	
2	52.49	3.51	
3	51.82	2.37	
4	50.77	2.41	
5	50.64	2.45	
6	50.44	2.47	
7	50.05	2.46	
8	49.27	2.50	
media	51.214	2.567	

Tab. 5.4 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto EN

5.1.4 <u>Impasto F5.0%</u>

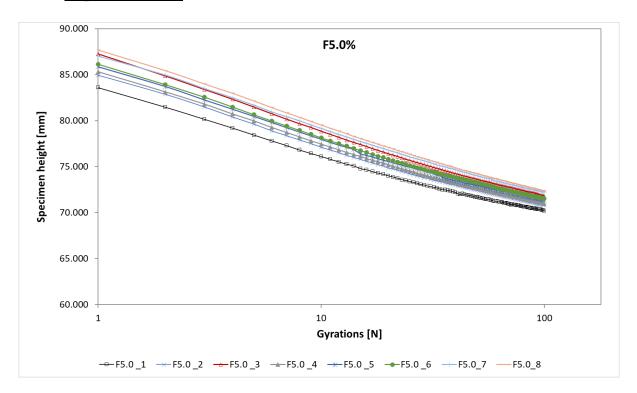


Fig. 5.4 - Curve di compattazione provini dell'impasto F5.0%

Provino	C ₁	k	
PIOVIIIO	[mm]	[/]	
1	52.94	2.18	
2	51.96	2.27	
3	50.45	2.40	
4	51.70	2.28	
5	51.32	2.31	
6	51.15	2.31	
7	50.38	2.34	
8	50.00	2.40	
media	51.583	2.293	

Tab. 5.5 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto F5.0%

5.1.5 <u>Impasto F6.5%</u>

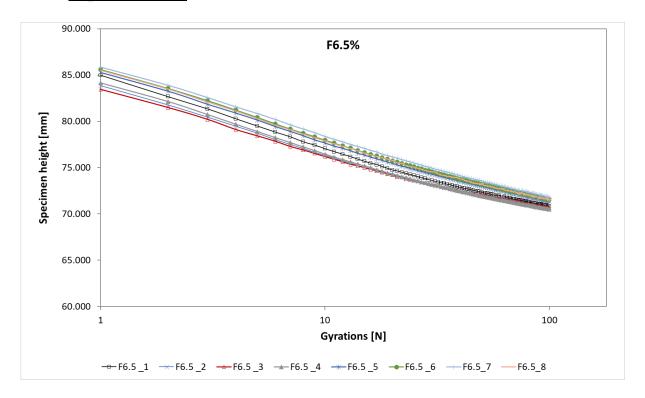


Fig. 5.5 - Curve di compattazione provini dell'impasto F6.5%

Provino	C ₁	k
PTOVITIO	[mm]	[/]
1	52.26	2.26
2	52.96	2.17
3	53.29	2.07
4	52.76	2.21
5	51.87	2.23
6	51.59	2.25
7	51.26	2.26
8	51.69	2.36
media	52.454	2.197

Tab. 5.6 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto F6.5%

5.1.6 Confronto parametri di compattazione

Nella tabella 5.7 possiamo osservare l'andamento dei valori medi di C e K; si rileva che la compattabilità è crescente all'aumentare del quantitativo di filler; i valori della lavorabilità K risultano maggior per gli impasti F2.0% e 5.0%.

	F0%	F2.0%	F3.5%	F5.0%	F6.5%
C (mm)	48.80	50.05	51.21	51.58	52.45
K	2.445	2.567	2.567	2.293	2.197

Tab. 5.7 – Valori medi per impasto di C e K

5.2 Perdita di acqua

5.2.1 Impasto F0%

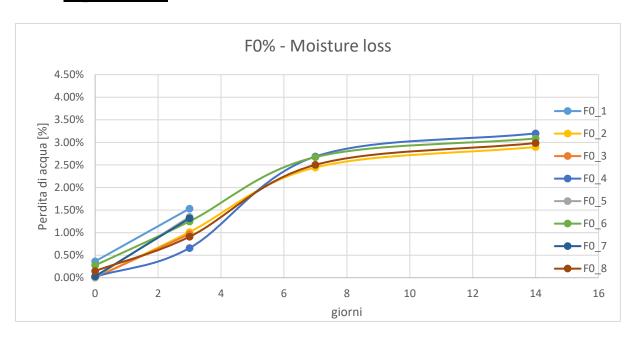


Fig. 5.6 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto F0%

5.2.2 Impasto F2.0%

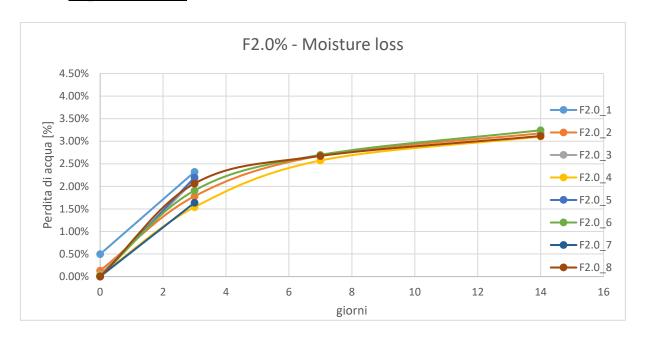


Fig. 5.7 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto F2.0%

5.2.3 Impasto F3.5%

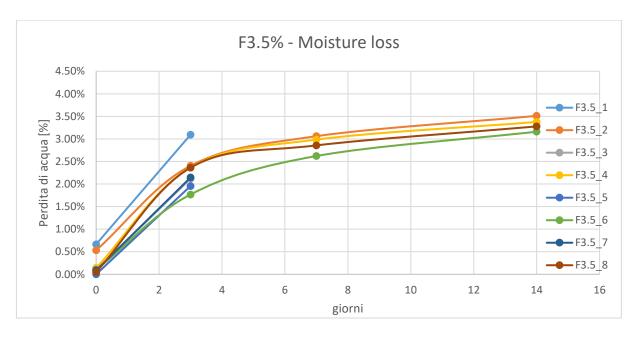


Fig. 5.8 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto F3.5%

5.2.4 *Impasto F5.0%*

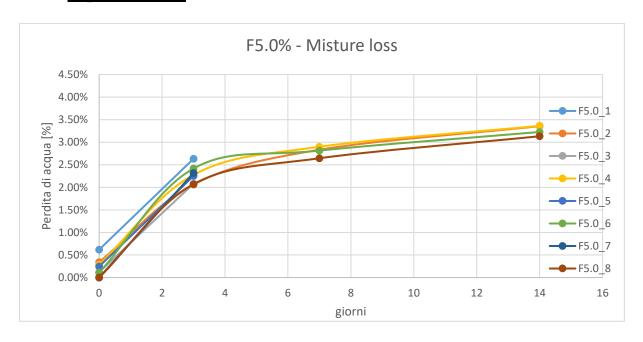


Fig. 5.9 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto F5.0%

5.2.5 *Impasto F6.5%*

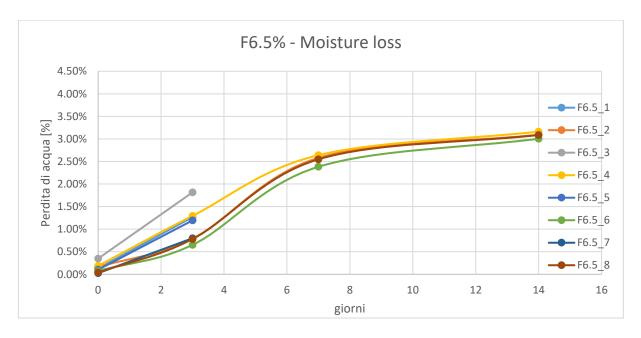


Fig. 5.10 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dell'impasto F6.5%

5.2.6 Confronto moisture loss

Nella figura 5.12, sono mostrati i valori medi riferiti a ciascun impasto relativi alla perdita di umidità a 3, 7 e 14 giorni. L'andamento a 3 giorni crea una discrepanza di valori tra i provini con una percentuale media di filler (F2.0%, F3.5% e F5.0) e i provini con percentuali basse e alte (F0% e F6.5%), con valori che sono rispettivamente del 2/2.3% e 1% di perdita di umidità. Invece maturando le miscele a 7 e 14 giorno avremo una perdita d'acqua molto simile tra i cinque impasti.

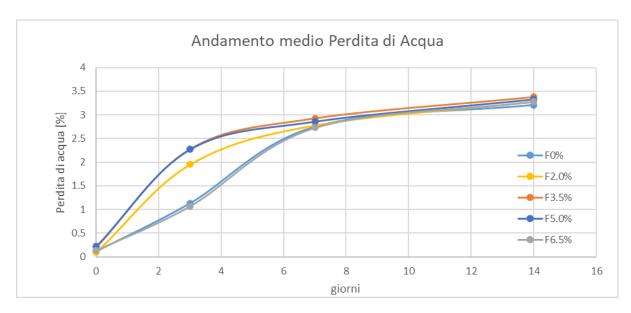


Fig. 5.11 - Perdita di acqua nel tempo nei provini dei cinque impasti

5.3 Vuoti

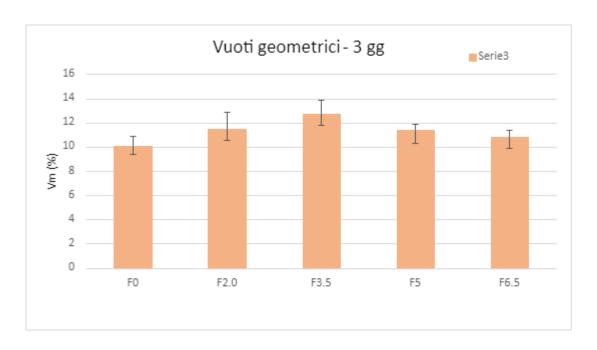


Fig.5.12 - Confronto percentuali di vuoti dei cinque impasti dopo 3 giorni

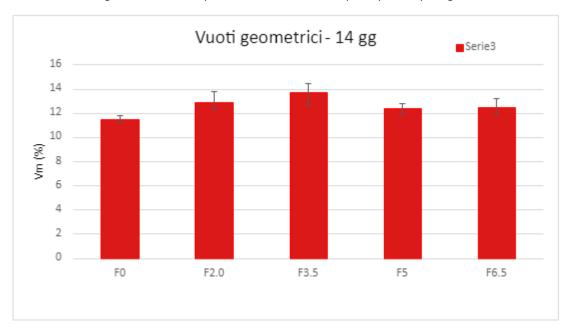


Fig. 5.13 - Confronto percentuali di vuoti dei cinque impasti dopo 3 giorni

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

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

5.4.1 Impasto F0%

	MODULI						
		a 3 gg		a 14 gg			
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	
F0_1	4123	4176	4150				
F0_2				4589	4378	4484	
F0_3	2671	2805	2738				
F0_4				3961	4177	4069	
F0_5	2692	2844	2768				
F0_6				6302	6481	6392	
F0_7	3377	3778	3578				
F0_8				6076	5916	5996	
		media	3864		media	6194	

Tab. 5.8 - Valori ITSM dell'impasto F0%

In questa tabella sono presenti valori colorati in rosso, riferiti ai provini 2,4,5 e 6, i quali non sono stati presi in considerazione per la sperimentazione a causa dei valori troppi bassi probabilmente dovuti a problematiche avvenute in fase di compattazione.

5.4.2 Impasto F2.0%

	MODULI					
	a 3 gg			a 14 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F2.0_1	5039	4755	4897			
F2.0_2				6635	6491	6563
F2.0_3	5357	4800	5079			
F2.0_4				6617	6467	6542
F2.0_5	4908	5051	4980			
F2.0_6				6599	6360	6480
F2.0_7	5679	5674	5677			
F2.0_8				6043	6958	6501
		media	5158		media	6521

Tab. 5.9 - Valori ITSM dell'impasto F2.0%

5.4.3 <u>Impasto F3.5%</u>

	MODULI						
	a 3 gg			a 14 gg			
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	
F3.5_1	5101	4729	4915				
F3.5_2				6219	5983	6101	
F3.5_3	5006	5053	5030				
F3.5_4				6696	6615	6656	
F3.5_5	5900	5317	5609				
F3.5_6				7291	6648	6970	
F3.5_7	5086	5074	5080				
F3.5_8				5747	5642	5695	
		media	5158		media	6355	

Tab. 5.10 - Valori ITSM dell'impasto F3.5%

5.4.4 Impasto F5.0%

	MODULI					
	a 3 gg			a 14 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F5.0_1	4306	4342	4324			
F5.0_2				6401	6345	6373
F5.0_3	4786	5267	5027			
F5.0_4				5920	6008	5964
F5.0_5	4538	4386	4462			
F5.0_6				6003	5791	5897
F5.0_7	4699	4732	4716			
F5.0_8				6938	6400	6669
		media	4632		media	6226

Tab. 5.11 - Valori ITSM dell'impasto F5.0%

5.4.5 *Impasto F6.5%*

	MODULI					
	a 3 gg			a 14 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
F6.5_1	4967	4512	4740			
F6.5_2				7229	6695	6962
F6.5_3	4841	5145	4993			
F6.5_4				7144	6712	6928
F6.5_5	4761	4706	4734			
F6.5_6				7240	6708	6974
F6.5_7	4417	4165	4291			
F6.5_8				7009	6800	6905
		media	4689		media	6942

Tab. 5.12 - Valori ITSM dell'impasto F6.5%

5.4.6 Confronti risultati ITSM

I risultati di questa prova indicano chiaramente che tutte le miscele superano il limite di capitolato di 3000 MPa con maturazione a 3 giorni, rappresentato dalla linea rosse nella figura 5.15, la risposta migliore viene fornita dalle miscele F2.0% e F3.5%. Per i provini maturati a 14 giorni si ha un andamento costante per le prime quattro miscele con valore di circa 6500 MPa, invece per l'impasto F6.5% il modulo raggiunge un modulo di 7000 MPa.

Nelle figure 5.13-5.14, troviamo i valori ITSM a 3 e 14 giorni rapportati alla percentuale di materiale passante al setaccio da 0.063mm. È importante rappresentare tali risultati in funzione del passante 0,063 mm, poiché il filler impiegato aveva già una certa percentuale di filler all'interno; quindi, in questo modo si oggettivizza la ricerca ed i risultati valgono in senso assoluto.

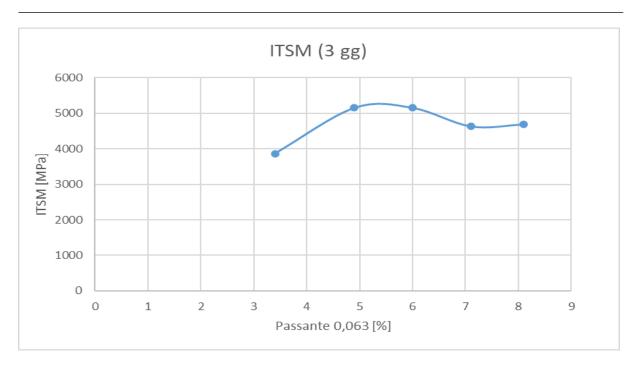


Fig.5.13 – Andamento ITSM con maturazione a 3 gg in relazione al passante al setaccio 0.0063 mm

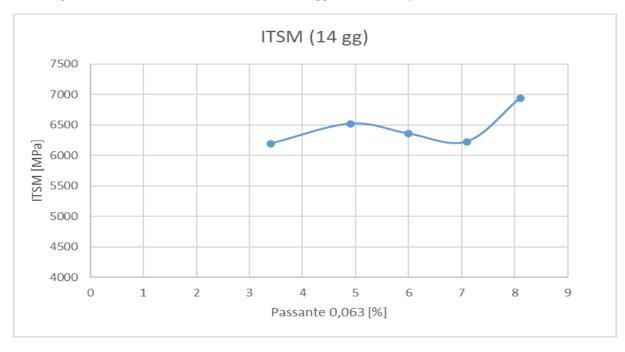


Fig.5.14 – Andamento ITSM con maturazione a 14 giorni in relazione al passante al setaccio 0.0063 mm

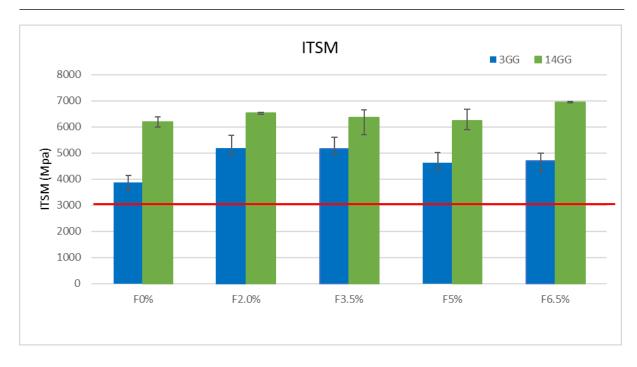


Fig. 5.15 – ITSM con maturazione a 3 e 14 giorni

5.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

In questo paragrafo verranno mostrati i dati ricavati dalla prova di rottura a trazione indiretta, descritta precedentemente nel *paragrafo 4.2.7*; in particolare sono illustrate:

- le curve sforzo-deformazione dei provini maturati a 3 e 14 giorni;
- i valori CTI (Indirect Tensile Coefficient) con maturazioni a 3 e 14 giorni.

5.5.1 <u>Impasto F0%</u>

	ROTTURE					
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 14 gg		
	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_{c}	P [Kn]	ITS [Mpa]
F0_1	0.014434	3.41945	0.203			
F0_2				0.014803	4.677812	0.25
F0_3	0.013813	3.11854	0.167			
F0_4				0.013727	4.328268	0.233
F0_5	0.0278	2.5046	0.134			
F0_6				0.015415	7.81155	0.461
F0_7	0.0179	3.9544	0.231			
F0_8				0.017423	7.319149	0.434
		media	0.217		media	0.448

Tab. 5.13 - Valori ITS dell'impasto F0%

Come già precedentemente descritto nel caso della prova di modulo a trazione indiretta, paragrafo 5.4.1, anche in questo caso i valori dei provini 2,3,4 e 5 sono stati scartati.

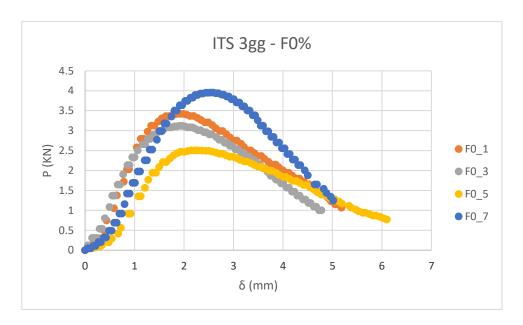


Fig. 5.16 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F0% con maturazione a 3 gg

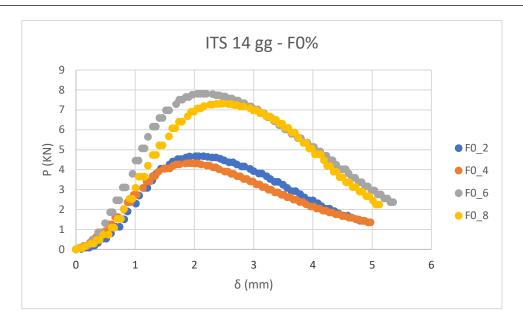


Fig. 5.17 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F0% con maturazione a 14 gg

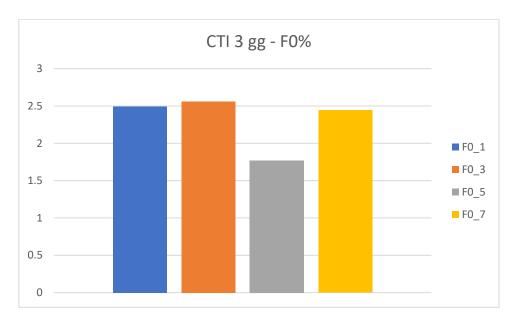


Fig. 5.18 – Valori CTI impasto F0% con maturazione a 3 gg

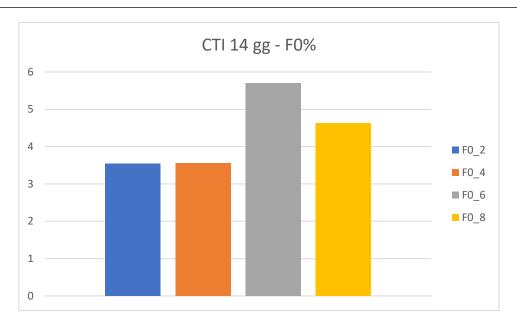


Fig. 5.19 – Valori CTI impasto F0% con maturazione a 14 gg

5.5.2 *Impasto F2.0%*

	ROTTURE					
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 14 gg		
	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]
F2.0_1	0.021637	5.87234	0.35			
F2.0_2				0.013979	8.343465	0.49
F2.0_3	0.016907	5.629179	0.33			
F2.0_4				0.018062	7.328267	0.431
F2.0_5	0.0142	5.975684	0.355			
F2.0_6				0.013843	8.231003	0.483
F2.0_7	0.01409	5.027356	0.295			
F2.0_8				0.014711	7.112462	0.411
		media	0.333		media	0.454

Tab. 5.14 - Valori ITS dell'impasto F2.0%

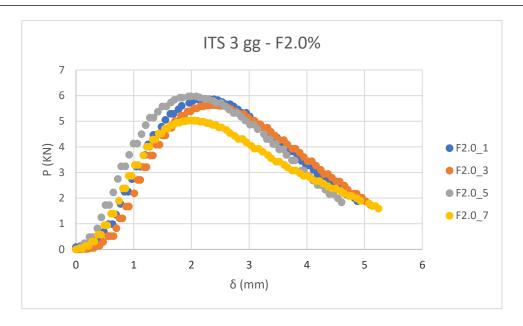


Fig. 5.20 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F2.0% con maturazione a 3 gg

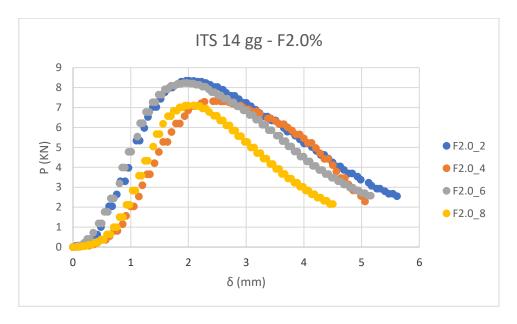


Fig. 5.21 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F2.0% con maturazione a 14 gg

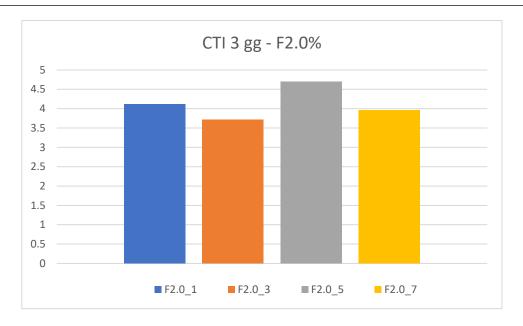


Fig. 5.22 – Valori CTI impasto F2.0% con maturazione a 3 gg

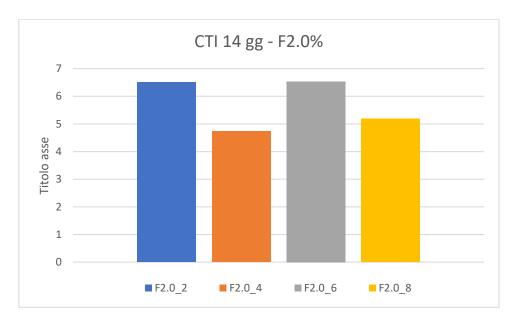


Fig. 5.23 – Valori CTI impasto F2.0% con maturazione a 14 gg

5.5.3 <u>Impasto F3.5%</u>

	ROTTURE					
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 14 gg		
	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]
F3.5_1	0.01362	6.5015	0.379			
F3.5_2				0.015112	8.28875	0.489
F3.5_3	0.016159	6.18237	0.364			
F3.5_4				0.013896	8.79635	0.511
F3.5_5	0.015007	5.714286	0.333			
F3.5_6				0.025846	8.0608	0.467
F3.5_7	0.018083	5.817629	0.337			
F3.5_8				0.0178	8.94833	0.515
		media	0.353		media	0.496

Tab. 5.15 - Valori ITS dell'impasto F3.5%

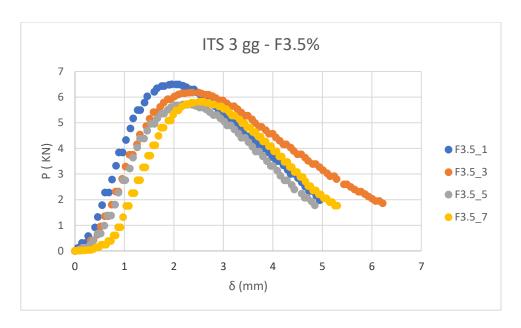


Fig. 5.24 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F3.5% con maturazione a 3 gg

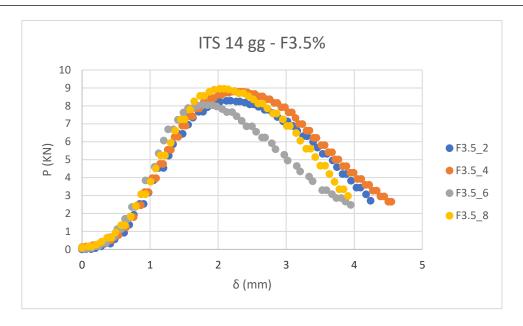


Fig. 5.25 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F3.5% con maturazione a 14 gg

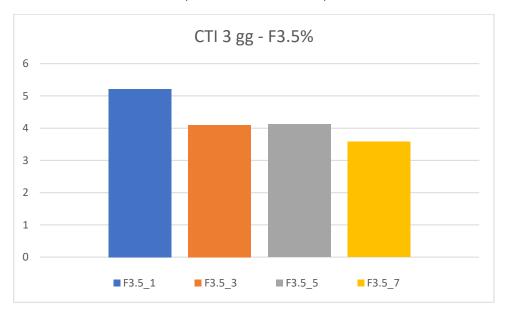


Fig. 5.26 – Valori CTI impasto F3.5% con maturazione a 3 gg

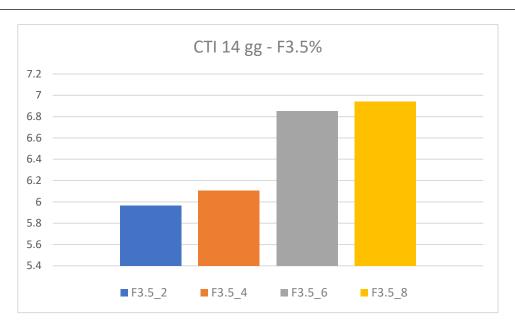


Fig. 5.27 – Valori CTI impasto F3.5% con maturazione a 14 gg

5.5.4 *Impasto F5.0%*

	ROTTURE					
	Rot	tura dopo :	3 gg	Rottura dopo 14 gg		
F5.0_1	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]
F5.0_2	0.017945	6.528876	0.393			
F5.0_3				0.051811	8.325228	0.494
F5.0_4	0.019866	5.422492	0.319			
F5.0_5				0.028642	9.109422	0.542
F5.0_6	0.017287	5.966566	0.354			
F5.0_7				0.025894	8.465046	0.5
F5.0_8	0.021955	6.416413	0.377			
				0.016202	8.93921	0.525
		media	0.361		media	0.515

Tab. 5.16 - Valori ITS dell'impasto F5.0%

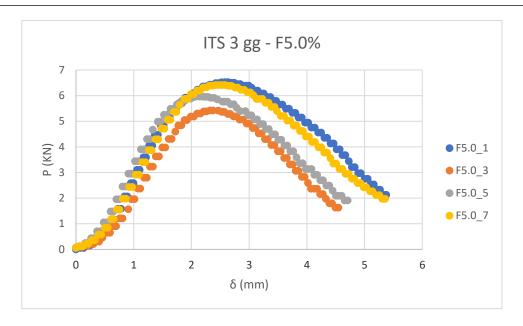


Fig. 5.28 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F5.0% con maturazione a 3 gg

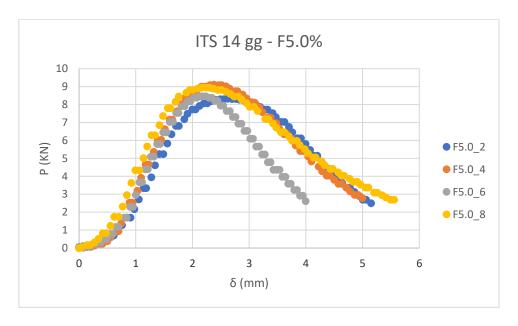


Fig. 5.29 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F5.0% con maturazione a 14 gg

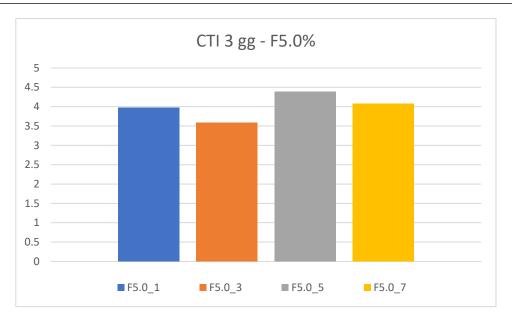


Fig. 5.30 – Valori CTI impasto F5.0% con maturazione a 3 gg

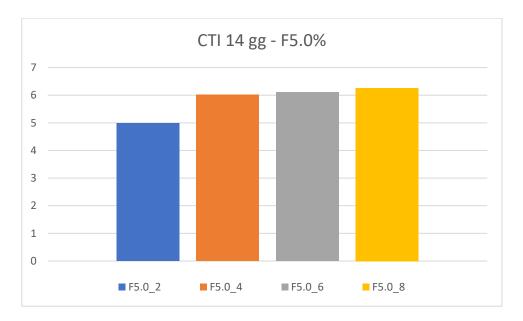


Fig. 5.31 – Valori CTI impasto F5.0% con maturazione a 14 gg

5.5.5 <u>Impasto F6.5%</u>

	ROTTURE					
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 14 gg		
	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ε _c	P [Kn]	ITS [Mpa]
F6.5_1	0.018232	4.908814	0.291			
F6.5_2				0.01418	8.17021	0.487
F6.5_3	0.015422	5.522796	0.328			
F6.5_4				0.01502	8.16413	0.487
F6.5_5	0.028574	4.984802	0.293			
F6.5_6				0.01256	8.08511	0.475
F6.5_7	0.014282	4.18237	0.245			
F6.5_8				0.01359	6.7538	0.397
		media	0.289		media	0.462

Tab. 5.17 - Valori ITS dell'impasto F6.5%

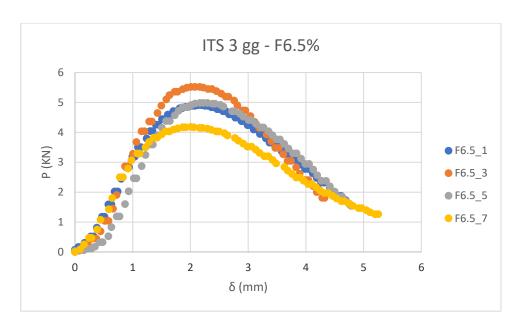


Fig. 5.32 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F6.5% con maturazione a 3 gg

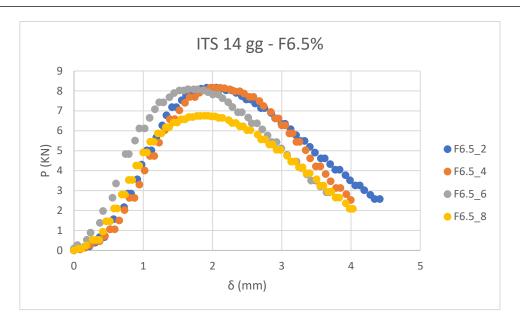


Fig. 5.33 - Curve sforzo-deformazione prova trazione indiretta impasto F6.5% con maturazione a 14 gg

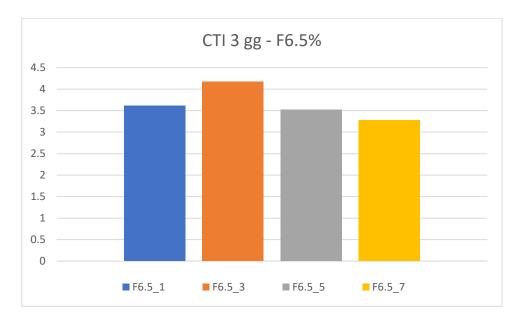


Fig. 5.34 – Valori CTI impasto F6.5% con maturazione a 3 gg

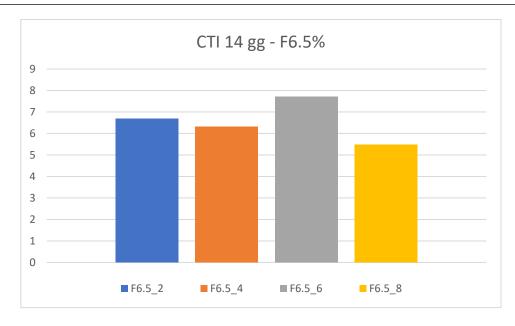


Fig. 5.35 – Valori CTI impasto F6.5% con maturazione a 14 gg

5.5.6 Confronti risultati ITS

Il grafico in figura 5.38 mostra i valori ITS medi degli impasti a 3 e 14 giorni. Da esso si può notare che le miscele con maturazione a 3 giorni non riescono a superare il limite di capitolato di 0.35 Mpa (linea rossa inferiore); al massimo le miscele F3.5% e F5.0% raggiungono il limite. I provini maturati a 14 giorni soddisfano tutti il valore massimo di 0.6 MPa imposto dal capitolato (linea rossa superiore), con valori tra 0.45 e 0.5 MPa.

Le due figure 5.36-5.37, ci indicano che per i provini maturati a 3 giorni abbiamo una risposta migliore per le miscele contenenti una percentuale di passante al setaccio da 0.063 mm compresa nel range 5-7%. Per gli impasti testati a 14 giorni il valore è circa costante con un piccolo incremento di ITS in quelli aventi tra 6% e 7% di materiale fino.

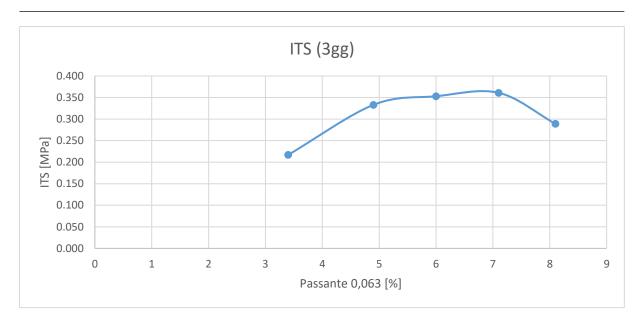


Fig.5.36 – Andamento ITS con maturazione a 3 giorni in relazione al passante al setaccio 0.0063 mm

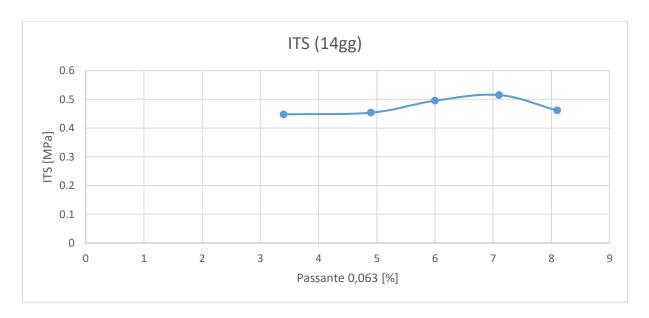


Fig.5.37 – Andamento ITS con maturazione a 14 giorni in relazione al passante al setaccio 0.0063 mm

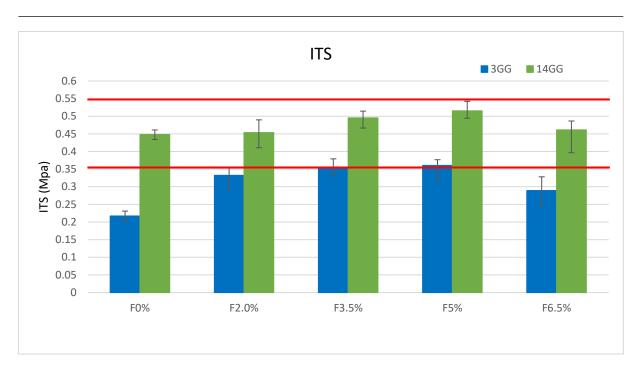


Fig.5.38 – ITS con maturazione a 3 e 14 giorni

Capitolo 6 - Conclusioni

La sperimentazione oggetto della tesi prevede lo studio delle prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo al variare della percentuale di filler. In particolare, sono state valutate 5 miscele:

- F0%: impasto con 0% di filler aggiunto;
- F2.0%: impasto con 2.0% di filler aggiunto;
- F3.5%: impasto con 3.5% di filler aggiunto;
- F5.0%: impasto con 5.0% di filler aggiunto;
- F6.5%: impasto con 6.5% di filler aggiunto;

Per ogni famiglia sono stati realizzati 8 provini, sui quali sono state eseguite prove volte a valutare:

- parametri di lavorabilità;
- Moduli di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) dopo 3, 14 giorni;
- Resistenza a rottura per trazione indiretta (ITS) dopo 3, 14 giorni.

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

- ➤ Il diverso quantitativo di filler all'interno della miscela comporta una differente lavorabilità e grado di addensabilità del provino; in particolare, a valori intermedi di filler (3,5%) si riscontra sia una migliore lavorabilità, che un maggior grado di addensabilità. Spostandosi da tale valore, i due parametri diminuiscono portando ad un peggioramento del materiale;
- anche i risultati della prova ITSM, a 3 e 14 gg, confermano il trend precedente, e quindi le miscele prodotte con il 3,5% di filler aggiunto hanno maggiore rigidezza. Scostandosi positivamente o negativamente da tali valori le rigidezze diminuiscono;
- ragionando invece in senso assoluto, e cioè guardando i risultati in funzione del passante 0.063 del singolo impasto, è evidente come il quantitativo ottimale di passante che deve essere presente nell'impasto per avere una rigidezza più alto è del 5-6%;
- anche i risultati della rottura a trazione indiretta confermano il trend precedente, sia a 3 che a 14 giorni di maturazione. Gli impasti 3,5% e 5,0% sono quelli con i valori più alti. Anche qui si ha un andamento a campana dei dati;
- considerando i valori ITS al variare del passante 0,063 è evidente come i materiali con un passante 0,063 pari a 5,5-7,0% sono quelli che danno più garanzie nei confronti della resistenza ultima; tuttavia, i valori della sperimentazione, a 3 giorni di maturazione, si collocano nel limite inferiore di capitolato (Bolzano) pari a 0,35 MPa;

In definitiva, le prestazioni meccaniche delle miscele riciclate a freddo hanno un andamento a campana in funzione della percentuale di passante 0,063 nella miscela; allontanandosi dal quantitativo ottimale (5,0%-7.0%) si ha un peggioramento delle prestazioni sia in termini di rigidezza che di resistenza ultima. Un eccessivo quantitativo si filler comporta un ritardo di evaporazione dell'acqua all'interno della miscela con conseguente peggioramento delle prestazioni a breve tempo; viceversa, un quantitativo inferiore comporta sempre un peggioramento a causa del fatto che il fresato in se contiene del passante che in realtà è polvere di bitume e non filler calcareo, che quindi ha meno potere legante.

Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia

- [1] Y.K. Kim, D.L. Little, I. Song "Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation", Transportation Research Record, 1832, pp. 1-8, 2003;
 - A.F. Faheem, U. H. Bahia "Conceptual Phenomenological Model for Interaction of Asphalt Binders with Mineral Fillers", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 78, pp. 680-717, 2009;
- [2] B.J. Smith, S. Hesp "Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Regular Fatigue Studies", Transportation Research Record,1728, pp. 75-81, 2000;
 - B. Delaporte, H. Di Benedetto, P. Chaverot, G. Gauthier "Effect of Ultrafine Particles on Linear Viscoelastic Properties of Mastics and Asphalt Concretes", Transportation Research Record, 2051, pp. 41-48, 2008;
- [3] "Evaluation of Interfacial Adhesion Property between Cement Asphalt Emulsion Mastic and Aggregate" Zhenjun Wang, Rui Wang, Jingjing Xiao, Weijie Li, Xiao Wang, and Jinting Wu.,2011;
- [4] Appunti corso di ingegneria civile "Pavimentazioni e materiali stradali", Prof. F.Canestrari;
- [5] Felice A. Santagata, "Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali", Pearson. Vol. 1 e vol.2.;
- [6] UNI EN 12697-31, Compattazione di provini cilindrici di miscele bituminose tramite pressa giratoria;
- [7] UNI EN 12697-23, Determinazione della Resistenza a trazione indiretta di provini cilindrici di miscele bituminose;
- [8] UNI EN 12697-26, Determinazione della Rigidezza;
- [9] Capitolato speciale d'appalto per lavori stradali Provincia autonoma di Bolzano;
- [10] Rosa L. "Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali", 2010;

- [11] Chen D. "Evaluation of long-term performance of cold in place recycled asphalt roads", 2006;
- [12] Viola P. "Caratterizzazione avanzata in laboratorio di materie prime secondarie rigenerate o stabilizzate con emulsione di bitume e leganti cementizi", 2013;

[13]

Sitografia

[S1] https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Rastelli-

2/publication/303811314 Influenza del filler sulle proprieta meccaniche e reologi che del mastice/links/57548c8508ae10d9337a3ee3/Influenza-del-filler-sulle-proprieta-meccaniche-e-reologiche-del-mastice.pdf

[S2] http://dietcad.unipv.it/corsi/PdIV/14%20-%20Sovrastrutture%20-%20pavimentazioni%20stradali.pdf