



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Variazione delle prestazioni delle basi a freddo in funzione dei tempi di maturazione

Performance variation of the cold bases as a function of the curing times

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Carlo Carpani

Tesi di Laurea di:

Gloria Sgattoni

Anno Accademico 2021 – 2022

*A mia madre,
che anche se oggi non può assistere fisicamente
al raggiungimento di questo mio traguardo,
c'è sempre stata.
Spero che tu possa esser fiera di me.*

*A mio padre,
per tutti i sacrifici fatti.*

*A mio fratello, mia cognata, mio nipote,
al mio ragazzo e a tutti i miei amici,
per aver illuminato i periodi bui
e per aver creduto in me
anche quando nemmeno io stessa
pensavo di farcela.*

Vi voglio bene.

Sommario

Capitolo 1 - Introduzione	7
Capitolo 2 - Stato dell'arte	9
2.1 La strada nel tempo.....	9
2.2 Stratigrafia Stradale	11
2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso	12
2.3 Ecosostenibilità, economia circolare e CAM	15
2.3.1 Riutilizzo di materiali nelle costruzioni stradali	19
2.4 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali	21
2.4.1 Tecniche di riciclaggio	23
2.5 Riciclaggio a freddo	24
2.5.1 In impianto	25
2.5.2 In situ.....	26
2.6 Influenza dei materiali costituenti il conglomerato bituminoso	28
2.6.1 Granulometria Rap e cemento.....	28
2.6.2 Emulsione bituminosa.....	29
2.6.3 Filler.....	30
2.6.4 Fibre	30
2.6.5 Acqua.....	31
2.7 Requisiti di Capitolato	32
2.7.1 Conglomerato bituminoso di recupero.....	32
2.7.2 Aggregati di integrazione	32
2.7.3 Leganti.....	33
2.7.4 Acqua.....	33
2.7.5 Miscela di aggregati	34

2.7.6	Studio della miscela	34
Capitolo 3	- Materiali	36
3.1	RAP	36
3.2	Filler.....	39
3.3	Emulsioni Bituminose.....	41
3.3.1	Emulsione Normale – RIGEVAL MC.....	44
3.3.2	Emulsione Modificata con Polimeri SBS – RIGEVAL CM	45
3.3.3	Emulsione Modificata con Lattice – RIGEVAL LX	47
3.4	Cemento Portland	48
3.4.1	Idratazione, presa e indurimento	49
3.4.1.1	Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento	50
3.4.2	Proprietà e ruolo del cemento nella pavimentazione	51
3.5	Acqua.....	52
Capitolo 4	- Test Methods e Programma Sperimentale	54
4.1	Obiettivo della sperimentazione.....	54
4.2	Apparecchiature e protocolli di prova	54
4.2.1	Analisi granulometrica	54
4.2.2	Massa volumica ed assorbimento degli aggregati.....	57
4.2.2.1	Procedura per aggregati di pezzatura 4 mm – 31,5 mm	59
4.2.2.2	Procedura per aggregati di pezzatura 0,063 mm – 4 mm	60
4.2.2.3	Elaborazione dei dati del picnometro	62
4.2.3	Preparazione dei provini	65
4.2.4	Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)	70
4.2.5	Determinazione delle proprietà volumetriche	78
4.2.5.1	Determinazione della massa volumica massima.....	78
4.2.5.2	Determinazione della massa volumica apparente	79

4.2.5.3	Determinazione del volume dei vuoti	79
4.2.6	Prova di Modulo a Trazione Indiretta	80
4.2.7	Prova di Trazione Indiretta.....	91
4.2.7.1	Sensibilità all'acqua	94
4.3	Miscele di progetto degli aggregati	95
4.4	Miscele di progetto	97
4.4.1	Codifica provini	97
Capitolo 5	- Analisi dei risultati	99
5.1	Emulsione Normale	100
5.1.1	Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità	100
5.1.1.1	Impasto AN	101
5.1.1.2	Impasto BN	102
5.1.1.3	Impasto CN	103
5.1.1.4	Impasto DN	104
5.1.2	Calcolo dei vuoti.....	104
5.1.3	Perdita di acqua	106
5.1.4	Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	106
5.1.5	Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	108
5.1.6	Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS	109
5.2	Emulsione Modificata con Polimeri	110
5.2.1	Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità	110
5.2.1.1	Impasto AP	111
5.2.1.2	Impasto BP	112
5.2.1.3	Impasto CP	113
5.2.1.4	Impasto DP.....	114
5.2.2	Calcolo dei vuoti.....	114

5.2.3	Perdita di acqua	115
5.2.4	Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	116
5.2.5	Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	117
5.2.6	Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS	118
5.3	Emulsione con Lattice	119
5.3.1	Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità	119
5.3.1.1	Impasto AL	120
5.3.1.2	Impasto BL	121
5.3.1.3	Impasto CL	122
5.3.1.4	Impasto DL	123
5.3.2	Calcolo dei vuoti	123
5.3.3	Perdita di acqua	124
5.3.4	Prove di Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	125
5.3.5	Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	126
5.3.6	Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS	127
5.4	Confronto tra le famiglie	128
5.4.1	Parametri di lavorabilità	128
5.4.2	Calcolo dei vuoti	128
5.4.3	Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)	129
5.4.4	Rottura a Trazione Indiretta (ITS)	131
5.4.5	Sensibilità all'acqua	132
Capitolo 6 - Conclusioni		133
Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia		136
Ringraziamenti		i

Capitolo 1 - Introduzione

La pavimentazione stradale è caratterizzata da vari strati sovrapposti, aventi materiali e spessori diversi, dettati anche dalle diverse funzioni che sono chiamati a svolgere. In generale, il loro ruolo è quello di sopportare le azioni indotte dal traffico, trasmetterle e distribuirle al terreno su cui poggiano, detto sottofondo. Nel corso degli ultimi anni, a causa dello sviluppo economico che ha generato un incremento del traffico veicolare ed in particolar modo dei mezzi pesanti, si è andati incontro ad un degrado accelerato del corpo stradale con conseguente necessità di interventi di ripristino e manutenzione atti a ristabilire i requisiti minimi di comfort e sicurezza di marcia.

Questi interventi, negli anni passati, prevedevano la demolizione di tutta o di una parte della pavimentazione ed il successivo rifacimento. Da tale procedura si ottiene un materiale comunemente noto come *RAP* o *fresato* che in passato veniva trasportato in discarica e trattato come rifiuto speciale. Negli ultimi anni, a seguito di una maggior sensibilità dal punto di vista ambientale e sulla base dei concetti connessi ad un'economia sostenibile, si sono sviluppati principi legati al riutilizzo delle materie prime e la salvaguardia delle risorse naturali per le generazioni future.

Proprio per i motivi appena citati, gli studi e le sperimentazioni messi in atto nel settore stradale negli ultimi decenni hanno come scopo l'ottenimento di soluzioni sempre più eco-sostenibili. Tra queste è possibile collocare la presente sperimentazione, il cui obiettivo è stato quello di arrivare ad una maggiore conoscenza prestazionale di recenti tecnologie per la riqualificazione stradale.

Tali tecnologie, come si vedrà nei prossimi capitoli, fanno riferimento all'utilizzo del conglomerato ottenuto mediante *riciclaggio a freddo* impiegato nella realizzazione dello strato di base del corpo stradale.

Più in dettaglio si andranno ad esaminare le differenze prestazionali ottenute mediante l'impiego di un conglomerato realizzato con diverse tipologie di emulsione bituminosa.

Tale 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 mediante:

1. Prove di Modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM)
2. Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)
3. Valutazione della Sensibilità all’Acqua tramite la prova ITSr.

I risultati ottenuti da ciascuna prova e relativi a ciascuna famiglia di materiale sono stati poi successivamente commentati.

Inoltre la presente tesi si sviluppa in sette capitoli:

- *Capitolo 1 – Introduzione*
- *Capitolo 2 – Stato dell’arte:*
Vengono affrontati i problemi delle pavimentazioni e quelli di carattere ambientale. Viene descritto il riciclaggio delle pavimentazioni, con particolare attenzione al riciclaggio a freddo, elencandone vantaggi e svantaggi.
- *Capitolo 3 – Materiali:*
Vengono illustrati i materiali utilizzati e le loro caratteristiche.
- *Capitolo 4 – 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 La strada nel tempo

La strada è un'infrastruttura di trasporto destinata alla circolazione dei veicoli terrestri (in particolar modo quelli su ruota) e marginalmente a pedoni ed animali. L'insieme delle strade viene definita rete stradale.

La necessità di realizzare strade nasce a seguito dell'invenzione della ruota e quindi con essa dei mezzi su ruota con lo scopo di poter far circolare questi ultimi su vie preferenziali regolari che permettessero di sfruttare al meglio le loro potenzialità.

Nel corso del tempo ci sono state naturalmente delle evoluzioni tecnologiche sulla realizzazione di strade. Tra le antiche civiltà Roma fu la prima e l'unica ad aver sostenuto ed ideato con continuità una politica stradale che permettesse loro di collegare l'intero impero in maniera efficiente e rapida. In particolar modo i romani facevano distinzione tra due tipologie di strade: la "*via silice strata*" e la "*via glarea strata*" cioè la via caratterizzata da lastricato per quanto riguarda la realizzazione di strade più importanti e quella invece munita da semplice massiccio per le strade secondarie. La larghezza delle strade romane era variabile e dotate ai lati di due banchine laterali. Inoltre diedero vita ad una configurazione di strada di tipo stratificato prevedendo l'utilizzo dei seguenti materiali lapidei: lo strato più profondo caratterizzato da pietre grosse poste in taglio (*statumen*), un secondo strato di ghiaia e ciottoli (*rudus*), in seguito pietrisco (*nucleus*) su cui poi veniva posato il pavimento in lastricato oppure una inghiaia finale (*summa crusta*) a seconda dell'importanza della strada come precedentemente accennato.

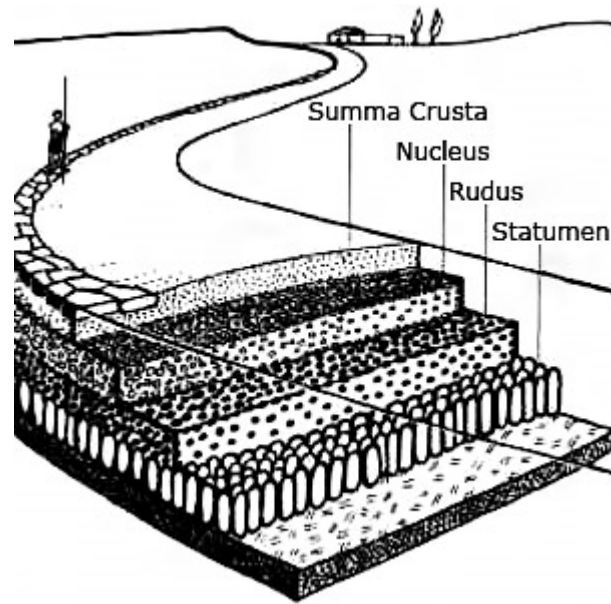


Figura 2.1 - Configurazione tipica di una strada romana

Nel corso del tempo questo sistema costruttivo ha subito modifiche evolvendosi e prevedendo l'impiego di materiali e metodi più innovativi fino ad arrivare alle tecnologie attuali che utilizzano il conglomerato bituminoso.

I leganti cominciarono a comparire intorno al ventesimo secolo, quando si passò dal traino animale dei mezzi a quello dei primi veicoli a motore con ruote gommate. Infatti questi ultimi generavano al loro passaggio polvere sulla superficie delle vie di transito e fango in caso di eventi piovosi anche lievi andando così ad impoverire la massicciata, al cui reintegro la manutenzione difficilmente riusciva a sopperire, causando così problemi sia igienici che operativi.

Tuttavia con l'evoluzione del traffico stradale, che ha visto l'impiego anche di mezzi più pesanti, l'utilizzo dei leganti pose nuove problematiche riguardanti la progettazione dei materiali stradali soprattutto a carichi di traffico maggiori.

Lo sviluppo nel tempo di nuovi metodi di costruzione e progettazione ha permesso di ottenere una maggior conoscenza delle caratteristiche dei materiali e delle tecniche di progettazione e manutenzione di una strada.

2.2 Stratigrafia Stradale

La strada viene definita come quell'elemento dotato di diversi strati sovrapposti tra di loro e realizzati con materiali differenti. La posizione di ciascuno di essi è dettata dalle specifiche funzioni che ogni strato deve assolvere. Per pavimentazione stradale, o sovrastruttura, si intende la parte superiore del corpo stradale, cioè quell'insieme di strati di vario materiale e spessore che poggiano sul sottofondo.

Le funzioni principali di queste grandi infrastrutture sono quelle di garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare nelle condizioni di sicurezza e comfort durante la guida di qualsiasi tipologia di veicolo. Inoltre un altro ruolo fondamentale della pavimentazione è quello di garantire che gli agenti atmosferici non possano filtrare fino agli strati più profondi della struttura causando danni alla sua integrità riscontrabili poi in superficie. Perciò la pavimentazione dovrà assolvere non solo a requisiti di tipo strutturali ma anche a quelli di tipo funzionale.

I requisiti strutturali comprendono:

- la **portanza**, ovvero la capacità di sopportare il carico veicolare giornaliero;
- la **durabilità**, ovvero la capacità di resistere ai fenomeni considerati degradanti come gli agenti atmosferici e la normale usura da utilizzo.

I requisiti funzionali comprendono:

- la **regolarità** e l'**uniformità** del manto stradale;
- l'**aderenza** dello pneumatico in tutte le condizioni atmosferiche.

Esse vengono progettate con una vita utile limitata (solitamente pari a circa 20 anni) per ragioni tecniche ed economiche, perciò l'attuale rete viaria italiana risulta ormai datata e si pone in maniera sempre più urgente la necessità di intervenire su quelle esistenti mediante operazioni di manutenzione e risanamento finalizzate al ripristino delle loro caratteristiche funzionali ottimali che sono ormai giunte al termine della loro vita utile.

Quindi l'obiettivo perseguito dall'ingegneria stradale è quello di individuare tecniche ecosostenibili ma allo stesso tempo efficienti per risolvere lo stato di degrado delle

pavimentazioni migliorandone così le proprie caratteristiche funzionali e strutturali rispondendo in tal modo ai requisiti ad esse richiesti piuttosto che svilupparne di nuove.

2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

A seconda del tipo di materiali utilizzati le pavimentazioni stradali si distinguono in rigide, semirigide e flessibili.

Una pavimentazione *rigida* prevede l'utilizzo di lastre di calcestruzzo posata su uno o più strati di fondazione in misto cementato e/o in misto granulare o direttamente poggiate sul terreno di sottofondo se questo garantisce un'adeguata capacità portante.

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

- 1. Strato d'usura, o tappeto (3-6 cm):** è lo strato a diretto contatto con gli pneumatici dei veicoli. Esso non svolge una funzione strutturale ma garantisce primariamente la regolarità del piano viabile e un'adeguata aderenza tra pneumatico e pavimentazione stradale in modo tale da assicurare il transito dei veicoli in condizioni di sicurezza e comfort, sia in caso di pavimentazione stradale asciutta che bagnata. Per garantire una maggiore aderenza e ridurre il fenomeno dell'aquaplaning vengono impiegati aggregati lapidei più pregiati e dotati di elevata macro-rugosità superficiale ottenibile adottando una miscela di aggregati poco ricca di sabbia. Tale strato inoltre può essere realizzato sia con conglomerati bituminosi chiusi, le cui prestazioni sono maggiori, che aperti ovvero drenanti.
- 2. Strato di collegamento (Binder) (6-8 cm):** strato il cui compito è sia quello di regolarizzazione dello strato di base garantendo così adeguata pendenza e planarità per la successiva stesa del sovrastante manto di usura, che quello di collegare gli strati di usura e base e di trasferire i carichi dalla superficie agli strati più profondi. Fornisce inoltre un contributo per assorbire le azioni flessionali indotte dai carichi. Generalmente è realizzato in conglomerato bituminoso chiuso o semichiuso.
- 3. Strato di Base (8-30 cm):** è lo strato di mezzo di tutta la struttura il cui ruolo principale è l'assorbimento delle sollecitazioni flessionali indotte dai carichi, la sua funzione quindi è principalmente strutturale. Proprio per questo motivo il suo spessore ma

anche le sue caratteristiche sono molto variabili poiché dipendenti dalle qualità del sottofondo, dal clima e dalla quantità di traffico pesante. 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. Gli aggregati hanno una dimensione massima più elevata mentre la percentuale di bitume è ridotta rispetto agli strati superiori (il che si traduce in una maggiore porosità). Tale strato può essere anche realizzato in misto granulare, cioè senza legante, nei casi in cui la richiesta di resistenza a trazione è bassa. Nel riciclaggio a freddo è previsto l'impiego di emulsione bituminosa: 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]*). A differenza del misto cementato, in questa circostanza il cemento non funge da legante, ma rappresenta un elemento fondamentale per la formazione del mastice che lega gli aggregati lapidei e permette di regolare la velocità di rottura dell'emulsione. Tutti questi aspetti fanno sì che la miscela riciclata a freddo con emulsione risulti meno fragile delle corrispondenti miscele realizzate con bitume schiumato o di quelle in misto cementato, garantendo conseguentemente maggiore resistenza a fatica (Anas, *Quaderni Tecnici Volume V, 2019, [6]*).

- 4. Strato di Fondazione (15-35 cm):** costituisce il penultimo strato più profondo della pavimentazione stradale ed è il primo livello di materiale lavorato ad essere in diretto contatto con il terreno di sottofondo. Il suo ruolo principale è quello di trasferire i carichi al sottofondo. Generalmente viene realizzato in misto granulare, quindi non legato, ma nelle pavimentazioni semirigide può essere anche in misto cementato (legato). Nel caso in cui la carenza o gli elevati costi degli inerti non permettano di usare il misto granulare, si ricorre alla sabbia stabilizzata con calce, cemento o bitume. Tenuto conto della sempre maggiore importanza delle tematiche ambientali e dell'ecosostenibilità, si è arrivati a realizzare anche questo strato in conglomerato riciclato a freddo in cui il legante bituminoso è introdotto per mezzo dell'emulsione, senza avere eccessive perdite prestazionali (Sangiorgi C., 2017, [9]).

5. Sottofondo (50-100 cm): costituisce il piano di posa della fondazione. Il suo ruolo principale è quello di garantire un'adeguata portanza che è determinante per la stabilità dell'intera pavimentazione. Infatti il comportamento di tale strato influenza la riuscita e la durata nel tempo della sovrastruttura ovvero i requisiti di funzionalità e di vita utile. Proprio per questo motivo il terreno di sottofondo deve rispettare alcune caratteristiche fornite dalla norma CNR-UNI 10006, sia dal punto di vista granulometrico che di portanza; quest'ultima viene classificata come buona se è pari a $15 \text{ kN} / \text{cm}^2$; media se è pari a $9 \text{ kN} / \text{cm}^2$ o scarsa se è pari a $3 \text{ kN} / \text{cm}^2$. Se la portanza è minore di $3 \text{ kN} / \text{cm}^2$ si dovrà attuare una bonifica del terreno oppure una sostituzione.

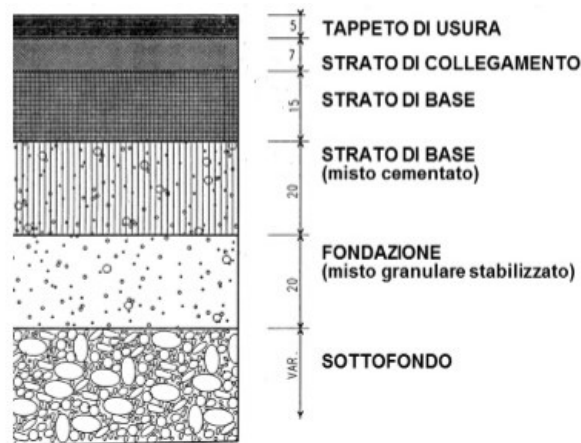


Figura 2.2 - Stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale semirigida

Una pavimentazione *flessibile* ha una composizione del tutto simile a quella semirigida, con l'unica differenza che lo strato di base è realizzato in conglomerato bituminoso senza l'utilizzo di misto cementato.

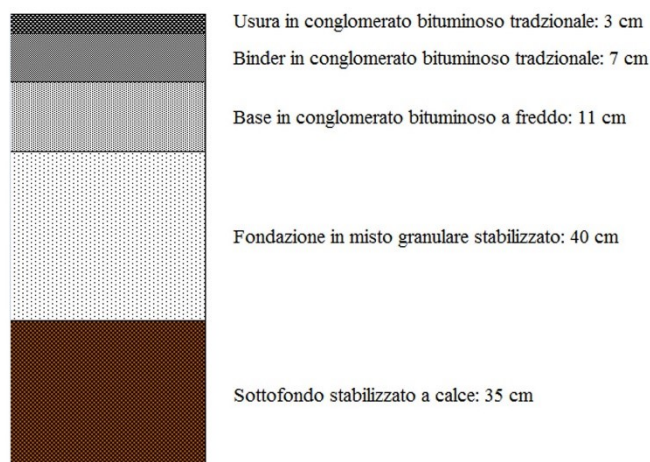


Figura 2.3 - Stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale flessibile

2.3 Ecosostenibilità, economia circolare e CAM

L'economia sostenibile è un tipo di economia che prevede uno sviluppo economico di una società che dovrà essere sostenibile a livello sociale, economico e ambientale, così da permettere alle risorse di rigenerarsi. In particolar modo un'economia sostenibile a livello ambientale prevede che le generazioni future possano disporre delle stesse risorse delle generazioni precedenti.

Per attuare però un'economia ecologicamente sostenibile è necessaria una riorganizzazione culturale, politica e scientifica ponendo sullo stesso piano l'ecologia e l'economia; ovvero sarà necessario fare in modo che i sistemi finanziari si adattino a quelle che sono le capacità rigenerative dell'ecosistema. La Terra, infatti, riesce a ripristinare le energie utilizzate in un determinato arco di tempo.

L'interesse verso questo argomento è progressivamente cresciuto dagli anni '70 in poi e attualmente si parla stabilmente di ecosostenibilità in molti settori, come ad esempio il settore alimentare, edilizio, energetico, dei trasporti, dei rifiuti, agricolo, industriale, della moda, ecc.

Per poter attuare un'economia sostenibile ed una sostenibilità ambientale e sociale è necessario mettere in atto quanto indicato dai concetti introdotti dall'economia circolare. Essa è fondata sul principio del riuso e riutilizzo; quindi, c'è il passaggio da un'economia di tipo lineare (basato sul tipico schema "estrarre, produrre, utilizzare e gettare") ad un'economia di tipo circolare dove un materiale, terminato il suo ciclo di vita non verrà considerato come un rifiuto bensì verrà riciclato e, laddove possibile, riutilizzato. Perciò è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile. Tutto questo per minimizzare l'impiego di materie prime andando piuttosto ad estendere il ciclo di vita dei prodotti e riducendo i rifiuti al minimo.

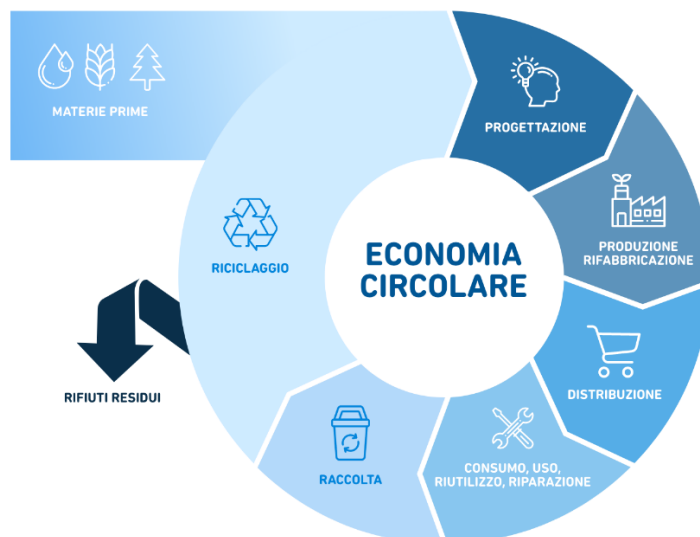


Figura 2.4 - Schema di funzionamento dell'Economia Circolare

Le fasi per un corretto funzionamento dell'economia circolare sono 7:

- **Progettazione:** ovvero progettare i prodotti secondo logiche di modularità, versatilità ed adattabilità per allungarne il più possibile la vita. Dev'essere chiaro fin dal principio l'impiego che potrà essere fatto dei materiali di cui è costituito privilegiando riuso e riciclo.
- **Produzione:** durante la realizzazione di un prodotto è necessario tener alti standard di sostenibilità ed efficienza in modo tale da permettere un risparmio di importanti quantità di energia e di emissioni inquinanti.
- **Distribuzione:** con lo sviluppo delle tecnologie digitali si può mettere in contatto domanda ed offerta in modo nuovo, ossia l'azienda non vende il prodotto al consumatore ma il servizio corrispondente. In tal modo si riducono i costi per entrambe le parti, si assicura il riciclo dei materiali ed il raggiungimento di un alto grado di efficienza.
- **Consumo, uso, riutilizzo, riparazione:** in questo nuovo modello è necessario anche un cambiamento di mentalità da parte del consumatore che dovrà preferire la manutenzione e la riparazione dei prodotti alla loro sostituzione per incrementarne la vita utile e ridurre l'impatto sull'ambiente.
- **Raccolta:** incentivare la raccolta differenziata per assicurare che i materiali raccolti siano di buona qualità per l'avvio al riciclo.

- **Riciclaggio:** è la fase attraverso cui il rifiuto diventa materia prima secondaria. Il riciclaggio tende ad essere più semplice ed efficiente grazie ad una corretta progettazione iniziale.
- **Rifiuti residui:** tutti quegli elementi che non possono essere reimmessi nel ciclo come materia prima secondaria che dovranno essere smaltiti rispecchiando la gerarchia dei rifiuti.

Ne consegue quindi l'urgenza nell'adozione di un'economia circolare piuttosto che lineare soprattutto a seguito dell'incremento della popolazione mondiale che ha generato un aumento di domanda delle materie prime importanti, portando in un futuro non molto lontano ad una scarsità di risorse e di conseguenza ad un aumento delle emissioni di CO₂.

Proprio per questo motivo a marzo 2020 la Commissione europea ha presentato il piano d'azione per una nuova economia circolare che include proposte sulla progettazione di prodotti più sostenibili e sulla riduzione dei rifiuti. I settori ad alta intensità di risorse, come elettronica e tecnologie dell'informazione e della comunicazione, plastiche, tessile e costruzioni, godono di specifica attenzione. A febbraio 2021 il Parlamento europeo ha votato per il nuovo piano d'azione per l'economia circolare, chiedendo misure aggiuntive per raggiungere un'economia a zero emissioni di carbonio, sostenibile dal punto di vista ambientale, libera dalle sostanze tossiche e completamente circolare entro il 2050. Sono anche incluse norme più severe sul riciclo e obiettivi vincolanti per il 2030 sull'uso e l'impronta ecologica dei materiali.

Per quanto riguarda, invece, i Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono i requisiti ambientali definiti per le varie fasi caratterizzanti il processo di acquisto, con lo scopo di individuare la soluzione (progettuale, il prodotto o il servizio) migliore dal punto di vista ambientale lungo il ciclo di vita tenendo conto della disponibilità sul mercato.

Attraverso il Decreto del Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del mare sono stati definiti questi criteri secondo quanto stabilito nel Piano per la sostenibilità ambientale dei consumi del settore della pubblica amministrazione.

Le categorie merceologiche che attuano tali criteri sono diverse e riguardano gli arredi, l'edilizia, la gestione dei rifiuti urbani e al territorio, i servizi energetici, l'elettronica, i prodotti tessili e calzature, cancelleria, ristorazione, servizi di gestione degli edifici e trasporti.

Per quanto riguarda l'edilizia, in particolar modo la costruzione e la manutenzione delle strade oggetto della presente tesi, i criteri hanno come scopo il raggiungimento degli obiettivi climatici iniziando dalla progettazione, passando alla scelta dei materiali fino alla realizzazione dei lavori in modo tale da favorire la circolarità delle risorse e ridurre le emissioni di gas serra. Un'attenta gestione del ciclo di vita consente inoltre di ottimizzare le risorse economiche degli enti e delle amministrazioni pubbliche preposte alla gestione e garantisce una maggior sicurezza per gli utenti.

L'utilizzo di tecnologie innovative e circolari per l'esecuzione dei lavori di manutenzione di una pavimentazione consentono il completo riciclo dei conglomerati bituminosi a temperature ridotte, generando così oltre che una riduzione dell'impiego di materiali vergini, anche un risparmio del 40% delle emissioni di CO₂ equivalente rispetto a lavori invece eseguiti con l'adozione di metodi tradizionali a caldo.

I punti proposti per accompagnare il settore stradale verso soluzioni più sostenibili e mettere in atto quanto definito dai CAM sono i seguenti:

1. Riutilizzo del conglomerato bituminoso da recupero
2. Efficienza energetica nella produzione e stesa dei conglomerati bituminosi: il raggiungimento di tale obiettivo necessita dell'esecuzione di pratiche che permettono l'utilizzo di conglomerati bituminosi preparati e stesi a basse temperature e l'impiego di fonti rinnovabili e soluzioni impiantistiche completamente elettriche.
3. Tecnologie con bitumi/conglomerati modificati e polimeri da riciclo: esse permettono di allungare il ciclo di vita della pavimentazione.
4. Programmazione delle manutenzioni e prevenzione dei dissesti: oltre ad incrementare la vita utile della pavimentazione, influenzano anche positivamente la sostenibilità dell'opera.
5. I CAM strade per accompagnare la transizione: l'utilizzo di un decreto CAM permette di orientare le scelte politiche verso tecnologie e soluzioni innovative e circolari a

ridotto impatto ambientale, nonché a stimolare il mercato al raggiungimento di tali obiettivi.

6. Adeguamento delle norme tecniche alla disponibilità di tecnologie innovative e circolari.
7. Valutazioni di costo ciclo di vita a supporto delle decisioni di spesa: permettono di prendere in considerazione i costi di ciclo di vita del bene inclusi quelli legati all'aspetto ambientale.
8. Formazione continua e condivisione di conoscenze in maniera tale da favorire e rendere più effettivo il percorso di transizione verso la sostenibilità del settore.

Perciò in ambito edilizio ed architettonico, come precedentemente affermato, l'ecosostenibilità è diventato un argomento fondamentale: si è entrati in un'era in cui si progettano e si costruiscono edifici con materiali a basso impatto ambientale, oppure si demoliscono vecchi edifici con l'intenzione di separare e recuperare le varie componenti per essere riutilizzate.

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

2.3.1 Riutilizzo di materiali nelle costruzioni stradali

Anche in ambito stradale si stanno tuttora conducendo studi e ricerche mirati al riutilizzo delle vecchie pavimentazioni demolite e di ogni tipologia di materiale di scarto ottenuto dalla produzione industriale. Alcune delle tecnologie che si sono sviluppate finora nel corso degli anni sono caratterizzate dai seguenti materiali:

- 1) Polverino di gomma
- 2) Scorie nere
- 3) Scorie bianche
- 4) Scorie da incenerimento
- 5) RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Il **polverino di gomma** è un materiale ottenuto dalla demolizione di vecchi pneumatici e rimpiiegato nella realizzazione di pavimentazione stradale fornendo alla stessa dei benefici ampiamente dimostrati, come ad esempio la riduzione del rumore generato al passaggio dei veicoli. In tal modo si riduce la loro presenza in discarica o, come spesso accade, si riducono le emissioni legate all'incenerimento.



Figura 2.5 - Polverino in gomma

Le **scorie nere** sono dei sottoprodotti siderurgici ottenuti da forni elettrici. Esse, molto frequenti in Italia, essendo dei materiali speciali, se non vengono reimpiegate dovranno essere smaltiti in sicurezza generando dei costi sia dal punto di vista ambientale che economico. È proprio per questo motivo che specifici studi ne hanno invece dimostrato la sua efficienza come aggregato in ambito stradale; grazie alle sue proprietà, viene attualmente impiegato come materiale granulare in sottofondi e fondazioni e come aggregato di alta qualità negli strati legati a bitume [B1].



Figura 2.6 - Scorie nere

Le **scorie bianche** sono scorie siderurgiche secondarie e vengono usate come integrazione a cemento o calce nei conglomerati con legante idraulico e nelle stabilizzazioni del suolo.

Le **scorie da incenerimento** sono scorie ottenute dall'incenerimento di rifiuti come indicato dallo stesso nome. Qualora esse vengano trattate come un rifiuto, verrebbero stoccate in

discarica, altrimenti se riutilizzate, in ambito stradale rappresentano un'alternativa ai filler e agli aggregati.

Il **RAP**, Reclaimed Asphalt Pavement, anche noto come *fresato*, è il conglomerato bituminoso di recupero ovvero il materiale risultante dalla fresatura o dalla demolizione di pavimentazioni a fine vita utile e dallo scarto di produzione in impianto. Rappresenta il materiale più facilmente riciclabile e può essere riutilizzato più volte consentendo il recupero sia dell'aggregato che del bitume presente.



Figura 2.7 - RAP

2.4 Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali

Per riciclaggio in ambito stradale si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale *fresato* per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Le motivazioni che spingono verso questa direzione sono molteplici:

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

Oggigiorno è diventato un argomento di primaria importanza al contrario di quanto invece accadeva in passato, quando si era soliti demolire la vecchia pavimentazione e costruirne una nuova utilizzando sempre aggregati lapidei e bitume nuovi. Questo provocava sia il consumo

di risorse non rinnovabili quali aggregati lapidei e bitume che la produzione di un'elevata quantità di materiali di risulta, con annessi problemi di stoccaggio e trattamento.

In Italia i primi tentativi di riciclaggio risalgono agli anni '70, dall'introduzione delle tecniche di fresatura delle pavimentazioni superficiali, che inizialmente era a caldo. Tale metodo presentava però delle problematiche necessitando perciò dello sviluppo di nuove tecnologie che nel 1983 ha portato alla realizzazione dei primi lavori di riciclaggio in situ con impianti mobili e riutilizzo del 100% del materiale fresato (Autostrada I.R.I.-tratto Magliano Sabina-Fiano). Infine, nel 1989 si hanno i primi esempi di riciclaggio cosiddetto *a freddo*, sia per la fresatura che per il confezionamento, con l'utilizzo di emulsioni bituminose, mediante appositi treni di riciclaggio. Negli anni successivi si è cercato di ottimizzare il processo con lo scopo di ridurre i tempi di attesa prima della riapertura al traffico, che inizialmente erano di 3-4 giorni che rappresentava il principale problema di questa tecnologia.

Nonostante ciò, l'Italia si trova indietro sull'adozione di queste nuove tecniche rispetto ai principali paesi europei; questo per motivi burocratici, complessità e non uniformità del regime delle autorizzazioni e pregiudizio che frenano lo sviluppo del riciclo. Infatti questa situazione colloca il nostro paese a livelli decisamente bassi: solo il 25% del fresato disponibile viene avviato a recupero, con grave spreco di risorse economiche (dati emersi da un'analisi condotta dal *Siteb – Associazione Strade Italiane e Bitumi*). Il fresato infatti, oltre ad avere elevate caratteristiche tecniche e ad essere totalmente riutilizzabile nelle costruzioni stradali, possiede un elevato valore economico.

Paesi	Fresato d'asfalto ottenuto dalla rimozione delle pavimentazioni stradali (t)	% di fresato recuperato
Francia	6.400.000	70%
Germania	13.000.000	84%
Spagna	494.000	83%
Olanda	4.500.000	71%
Regno Unito	3.400.000	90%
Turchia	2.570.000	9%
USA	72.500.000	96%
Italia	9.000.000	25%

Tabella 2.1 - Percentuali di materiale recuperato

Il riciclaggio permette, soprattutto dal punto di vista della salvaguardia ambientale, di:

- ✓ adottare una filosofia progettuale basata sul criterio di riutilizzare tutto il materiale di risulta, in tutti i cicli di manutenzione futuri;
- ✓ utilizzare il più possibile tecniche che mirino al recupero del 100% del materiale;
- ✓ adottare tecnologie che salvaguardino il più possibile l'ambiente, e sotto tutti gli aspetti.

Per quanto riguarda l'ultimo punto, premettendo che esistono due diverse modalità di riciclaggio (quello in impianto fisso e quello in situ), è anche importante specificare che la migliore soluzione è quella del riciclaggio in situ, ove possibile, in quanto permette di ridurre contemporaneamente i costi, l'inquinamento ambientale e i consumi energetici derivanti dai continui trasporti tra cantiere e impianto. Per non parlare poi degli inevitabili rallentamenti del traffico ai quali sono soggetti questi trasporti diretti al cantiere, quindi se ne guadagna anche in termini di efficienza. Nel caso invece di riciclaggio a caldo è preferibile utilizzare la procedura in impianto poiché risulta meno inquinante.

2.4.1 Tecniche di riciclaggio

Come abbiamo precedentemente accennato, tenendo conto del luogo dove il riciclaggio viene effettuato, possiamo fare una prima distinzione tra quello in impianto fisso e quello in situ; in relazione invece agli scambi energetici presenti all'atto di confezionamento troviamo il riciclaggio a caldo e quello a freddo.

In realtà, oltre alle due citate, è possibile adottare anche una terza tecnica riguardante le miscele bituminose tiepide; essendo però quest'ultima tecnologia attualmente disponibile solo in impianti fissi, essa diventerà pertanto veramente efficiente solo quando verrà diffusa in impianti mobili.

Le altre tipologie, invece, possono combinarsi tra loro, ottenendo quindi la possibilità di riciclaggio sia a caldo che a freddo sia negli impianti fissi che negli impianti mobili.

Segue una trattazione che pone maggiormente l'attenzione sull'argomento di questa tesi, ovvero il riciclaggio a freddo.

2.5 Riciclaggio a freddo

Per riciclaggio a freddo si intende qualsiasi tecnica di confezionamento di una miscela che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso invecchiato e demolito aggiunto a temperatura ambiente senza essere preventivamente riscaldato.

La demolizione viene effettuata mediante l'utilizzo di una fresa che opera la cosiddetta fresatura "a freddo", molto più innovativa rispetto alla fresatura "a caldo" praticata negli anni '70 poiché permette di demolire e stoccare il materiale prodotto senza che questo subisca penalizzazioni in termini di lavorabilità.



Figura 2.8 - Esecuzione di fresatura a freddo

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

- materiale di recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o 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.

Va ovviamente posta particolare attenzione alla determinazione delle caratteristiche del fresato, che permetterà conseguentemente di regolare la quantità e qualità degli altri componenti della miscela, con lo scopo di ottenere il miglior prodotto finale possibile.

Rispetto a quella a caldo, i principali vantaggi di questa tecnica sono:

- ✓ Riduzione dell'impatto ambientale dovuto alla diminuzione dell'emissione di fumi, gas e polveri generati in fase di riscaldamento e trasporto;
- ✓ Risparmio energetico per il mancato riscaldamento degli aggregati;
- ✓ Riduzione dell'impiego di aggregati vergini consentendo di usufruire di una percentuale di conglomerato bituminoso di recupero molto più elevata.

Il riciclaggio a freddo può essere effettuato in impianto oppure direttamente in situ.

2.5.1 In impianto

Le macchine utilizzate per il riciclaggio a freddo si suddividono in fisse e semoventi; queste ultime sono degli elementi mobili installati in cantiere che permettono quindi di ridurre i costi e le emissioni indotte dal trasporto del fresato.



Figura 2.9 - Impianto fisso per la produzione di conglomerato a freddo



Figura 2.10 - Impianto per la produzione di conglomerato a freddo

Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto: discontinuo o continuo. La differenza sostanziale tra i due ricade nella modalità di dosaggio degli inerti e del legante. Nel primo caso inerti e legante vengono pesati e solo dopo aver raggiunto un determinato quantitativo vengono inviati al ciclo produttivo. Nel secondo caso invece l'immissione dei materiali è continua, ciò rende il processo produttivo più veloce ma meno preciso in termini di dosaggio.

Il conglomerato fresato in ingresso all'impianto viene frantumato e rifezionato. In base alla curva granulometrica si stabilisce l'apporto di aggregati vergini per correggere la curva. RAP e aggregati vergini vengono trasportati, per mezzo di nastri, al mescolatore in cui avviene la miscelazione.

Durante la miscelazione viene aggiunto:

- Il legante, che può essere emulsione bituminosa o bitume schiumato con dosaggio tra 3 e 6%
- L'acqua di aggiunta, per migliorare la lavorabilità
- Filler
- Additivi calcarei o silicei. Il più usato è il cemento, con dosaggio 1-3%, la sua funzione è quella di migliorare la resistenza del conglomerato e di favorire la rottura dell'emulsione.

Una volta completata la miscelazione, il conglomerato viene direttamente caricato sui mezzi e portato in cantiere.

2.5.2 In situ

Il riciclaggio a freddo in sito è la tecnologia che favorisce il maggior vantaggio economico ed ambientale in assoluto, garantendo anche l'affidabilità tecnica del risultato finale e che per tali motivi risulta sempre più diffusa.

Tra i vantaggi perciò troviamo quelli:

- ambientali → legati alla possibilità di recuperare il 100% della pavimentazione preesistente. Questo riduce il quantitativo di materiale da destinare alla discarica e le aree utilizzate per tale scopo. Inoltre, permette di diminuire l'inquinamento causato dalle emissioni per il trasporto del RAP e per il riscaldamento del bitume;

- prestazionali → le modalità di realizzazione ed il controllo delle varie fasi di miscelazione, nonché della stesa e della posa in opera del materiale riciclato, ne garantiscono prestazioni elevate;
- tempistici → l'utilizzo di moderni *treni di riciclaggio* permettono un'elevata produttività che si traducono in tempi di costruzione della pavimentazione molto minori rispetto a quelli tradizionali, riducendo così le problematiche alla circolazione legate alla presenza di un cantiere;
- Mobilitazionali → le fasi esecutive risultano più sicure e agevoli grazie alla collocazione del treno di riciclaggio su di una sola corsia stradale.

Per quanto riguarda i treni di riciclaggio utilizzati per il riciclaggio a freddo, precedentemente citati, sono caratterizzati da un insieme di macchine operatrici semoventi disposte in fila indiana che possono differenziarsi in base alla tipologia di macchinari utilizzati in funzione delle modalità previste per l'esecuzione dell'intervento. Esse sono di notevoli dimensioni e possono essere montate sia su cingoli che su ruote gommate.



Figura 2.11 - Impianto per la produzione di conglomerato a freddo

La componente principale delle riciclatrici è il rotore di fresatura e miscelazione composto da utensili da taglio per la frantumazione della pavimentazione. Per ottimizzare la produzione giornaliera ed ottenere una maggiore omogeneità della miscela si può pensare di demolire prima con la fresatrice e successivamente miscelare con la riciclatrice. Il legante bituminoso (emulsione o bitume schiumato) e l'acqua sono iniettati nel vano di miscelazione (Figura 2.12).

Gli aggregati di integrazione e il cemento vengono solitamente posizionati sulla pavimentazione stradale ammalorata antistante la riciclatrice.

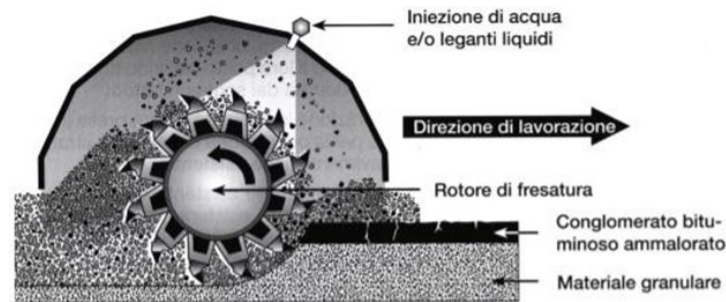


Figura 2.12 - Tamburo di fresatura

Lo strato riciclato a freddo risulta più prestante del misto cementato tenendo conto di un'accurata e precisa costruzione della pavimentazione stradale e un attento controllo delle fasi di miscelazione.

2.6 Influenza dei materiali costituenti il conglomerato bituminoso

Le miscele riciclate a freddo, poiché ottenute dall'unione di più elementi, saranno da essi influenzate, incidendo sulle loro caratteristiche prestazionali, perciò andiamo a vedere cosa accade al conglomerato al variare dei materiali utilizzati basandoci su studi precedentemente fatti e presenti in letteratura.

2.6.1 Granulometria Rap e cemento

Il RAP dovrà essere sottoposto, prima del suo utilizzo, ad un'attenta analisi di laboratorio che permetta di studiare la distribuzione dimensionale delle particelle, i leganti e gli additivi.

Lo studio dell'interazione dell'emulsione bituminosa col RAP fornisce informazioni sui legami tra bitume e particella solida, in presenza di un certo contenuto idrico, perciò dovrà essere effettuato su scala microscopica.

Inoltre, l'esecuzione delle prove di trazione indiretta e di modulo dinamico hanno fornito i seguenti risultati [Giuliani, 2021, [29]]:

- la composizione granulometrica del fresato è importante per assicurare una distribuzione omogenea del legante negli interstizi ed anche la presenza di una matrice

solida litica. Le aree di contatto tra legante ed aggregato tenderanno ad aumentare al diminuire del contenuto di particelle fini;

- il cemento forma legami che collaborano con il bitume presente nell'emulsione; in particolar modo quando il contenuto di emulsione è basso il cemento ed il bitume sono elementi indipendenti per le particelle leganti, distribuiti in modo pressoché simili, all'aumentare del contenuto di emulsione il bitume perde la sua funzione legante poiché copre le particelle di cemento e/o interrompe la continuità delle fibre di cemento. Un ulteriore aumento del quantitativo di emulsione porta ad un incremento delle zone di contatto con conseguente incremento delle prestazioni meccaniche del conglomerato soprattutto in termini di resistenza a trazione indiretta;
- inoltre il quantitativo di cemento deve essere proporzionato al contenuto d'acqua poiché sperimentazioni specifiche hanno dimostrato che a parità d'acqua la miscela con maggior cemento interrompeva i processi di idratazione per evaporazione della stessa non sfruttando a pieno le sue potenzialità.

2.6.2 Emulsione bituminosa

Le emulsioni bituminose impiegate nelle miscele riciclate a freddo possono essere molto diverse tra loro e conducono a risultati completamente differenti dei conglomerati. Questo è stato sperimentalmente verificato confrontando le prestazioni meccaniche, sia nel breve che nel lungo termine, delle miscele realizzate adottando gli stessi dosaggi e materiali e variando la tipologia di emulsione.

Per quanto riguarda le caratteristiche volumetriche (lavorabilità ed addensamento finali) sono risultate indipendenti dalla tipologia di emulsione bituminosa adottata; al contrario, invece, le prestazioni a breve termine, quindi subito dopo costipamento, hanno evidenziato che i valori di modulo elastico e di resistenza a trazione indiretta (entrambi condotti a 20°C) sono dipendenti dalla rigidità del bitume presente nell'emulsione.

Inoltre dalle prove di rottura si evince che con la maturazione si ha una variazione delle condizioni di deformazione ultima, sottolineando la riduzione di deformazioni orizzontali accompagnata dall'incremento di quelle verticali che la maggior parte dei provini presenta [Giuliani, 2021, [28,29]].

2.6.3 Filler

Le analisi sperimentali condotte con lo scopo di studiare le prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo al variare della quantità di filler ha messo in evidenza come [Di Litta, 2021, [100]]:

- all'aumentare della percentuale di filler aggiunto nel campione, le miscele tendono a perdere la loro lavorabilità;
- al variare del quantitativo di filler introdotto non si rilevano significative differenze sul volume di vuoti delle miscele;
- introducendo troppo filler, esso genera un ritardo nell'evaporazione dell'acqua sviluppando più tardi le prestazioni attese; al contrario, invece, queste tendono a peggiorare all'introduzione di un quantitativo troppo basso di filler in quanto il fresato contiene del passante ma non si tratta di filler calcareo bensì di polvere di bitume che non possiede proprietà leganti.

2.6.4 Fibre

Per quanto riguarda le fibre invece, sono dei materiali che possono essere inseriti nel conglomerato bituminoso riciclato a freddo con lo scopo di conferirgli migliori caratteristiche prestazionali. In particolar modo è stato visto che [Giuliani, 2021, [190]]:

- esse conferiscono alla miscela un minor addensamento iniziale, ma una lavorabilità leggermente superiore.
- esse non modificano l'influenza dell'acqua sulla miscela come confermano le prove di sensibilità all'acqua appositamente eseguite.
- mettendo a paragone due famiglie di miscele, una di riferimento ed una caratterizzata da fibre è possibile notare che all'aumentare del grado di maturazione della miscela entrambe presentano un incremento del trend relativo all'ITS e ITSM. Più dettagliatamente come, a parità di miscela, quella con le fibre presenta una resistenza a rottura ITS più alta rispetto a quella senza, in tutti i gradi di maturazione presi in esame, eccezion fatta per quelli a 30 giorni. Questo è spiegato dal fatto che le fibre assorbendo acqua accelerano la maturazione della miscela. Nelle prove invece di rigidità la situazione tende a

ribaltarsi, cioè ad ogni grado di maturazione la miscela priva di fibre presenta una rigidità maggiore rispetto a quella con fibre; questo dovuto al fatto che esse presentano un maggior contenuto di vuoti fornendo così una minor rigidità;

- dalla prova ITS è stato possibile notare come l'energia sottesa alla curva era molto maggiore nella famiglia delle fibre rispetto a quella di riferimento, e questo vale sia per l'energia pre-rottura che per quella post-rottura;
- dall'esecuzione di una specifica prova di laboratorio è stato constatato come la presenza delle fibre determinasse una maggior resistenza a fatica della miscela; questo non determina una maggior duttilità del materiale bensì sono le fibre che entrano in gioco nel momento in cui il materiale dovrebbe iniziare a fessurarsi;
- inoltre i risultati delle prove di modulo complesso hanno permesso di definire come la presenza di fibre renda il materiale meno rigido.

2.6.5 Acqua

L'acqua è elemento che svolge un ruolo importante nel confezionamento delle miscele riciclate a freddo poiché ne regola:

- l'addensabilità e la lavorabilità che sono importanti su questa tipologia di riciclaggio in quanto caratterizzato da una maggior difficoltà di impastare i componenti della miscela e di costipare il materiale. La lavorabilità è direttamente legata all'umidità della miscela cioè una maggior umidità implica una maggior lavorabilità;
- i meccanismi di rottura dell'emulsione dipendono dalla velocità di rottura adottata, in ogni caso l'emulsione potrebbe non essere sufficiente a garantire la lavorabilità già ridotta dalla presenza di cemento, quindi è necessario aumentare l'acqua piuttosto che l'emulsione stessa.
- la presa e l'indurimento della frazione cementizia sono importanti per l'acquisizione delle caratteristiche prestazionali della miscela, è proprio per questo motivo che non è possibile aumentare all'infinito il contenuto d'acqua che determinerebbe uno sviluppo di resistenze ritardato ed una durata di vita della miscela inferiore;
- i tempi di riapertura al traffico invece tenderanno ad essere più lunghi se si utilizzasse un contenuto d'acqua superiore al valore ottimale per i maggiori tempi richiesti per l'evacuazione della stessa.

2.7 Requisiti di Capitolato

In questo paragrafo andremo a definire le prescrizioni del Capitolato Speciale d'Appalto per lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano riguardanti i conglomerati bituminosi riciclati a freddo per la realizzazione degli strati di base delle pavimentazioni stradali.

2.7.1 Conglomerato bituminoso di recupero

Il conglomerato bituminoso di riciclo proviene dalla demolizione (totale o parziale) di pavimentazioni stradali o aeroportuali, tramite l'utilizzo di mezzi come fresatrici o escavatori. Qualora vengano utilizzate le pale meccaniche è necessario successivamente un processo di frantumazione per la riduzione delle dimensioni dei materiali. Per quanto riguarda invece la miscelazione, se essa avviene in impianto è prevista una vagliatura del conglomerato bituminoso per eliminare i grumi di dimensioni superiori rispetto alla massima prevista dalla miscela; questa operazione non è invece prevista con la miscelazione in sito tramite Pulvimixer. L'analisi granulometrica del conglomerato deve essere effettuata sul materiale vagliato in impianto mentre, in sito, dopo il passaggio del Pulvimixer.

2.7.2 Aggregati di integrazione

Gli aggregati impiegati dovranno essere conformi al Regolamento (UE) n. 305/2011 relativo ai prodotti da costruzione e devono presentare la marcatura CE attestante la conformità all'appendice ZA della Norma Europea Armonizzata UNI – EN 13043.

Inoltre la curva granulometrica di progetto non sarà solamente caratterizzata dal fresato ma è necessario l'impiego di aggregati vergini che consentano la sua correzione.

Gli aggregati grossi e fini devono soddisfare i requisiti indicati nelle due tabelle seguenti (2.2-2.3).

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

Tabella 2.2 - Requisiti aggregati grossi

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

Tabella 2.3 - Requisiti aggregati fini

2.7.3 Leganti

Nel riciclaggio a freddo il bitume presente nei conglomerati di recupero deve essere integrato con quello presente nell'emulsione bituminosa ed è necessaria un'emulsione cationica a rottura lenta con il 60% di bitume residuo che soddisfi le specifiche presenti nella *Tabella 2.4*.

EMULSIONE DI BITUME MODIFICATO C60BP10					
Requisito	Norma	Simbolo	Unità di misura	Valori richiesti	Classe
Contenuto di acqua	UNI EN 1428	W	%	40+/-1	-
Contenuto di bitume	UNI EN 1428	r	%	60+/-1	6
Contenuto flussante	UNI EN 1431	-	%	0	-
Sedimentazione a 7gg	UNI EN 12847	ST	%	≤10	3
pH (grado di acidità)	UNI EN 12850	pH		2 - 4	-
Miscelazione con cemento	UNI EN 12848		%	< 2	10
<i>Residuo bituminoso (per evaporazione)</i>					
Penetrazione a 25 °C	UNI EN1426	-	0,1 mm	50-70	3
Punto di rammollimento	UNI EN1427	-	°C	> 60	2
Punto di rottura (Frass)	UNI EN 12593	-	°C	< -13	-
Ritorno elastico a 25 °C	UNI EN 13398	R _E	%	≥ 50	5

Tabella 2.4 - Requisiti emulsioni bituminose modificate

Per quanto riguarda il cemento invece, esso deve essere conforme al Regolamento 305/2011/CPR relativo ai prodotti da costruzione con dichiarazione di prestazione (DoP) e, come per gli aggregati, deve presentare la marcatura CE attestante la conformità all'appendice ZA della norma europea armonizzata UNI - EN 13282-1 e UNI - EN 13282-2.

2.7.4 Acqua

L'acqua che verrà impiegata deve essere priva di impurità, secondo quanto stabilito dalla norma UNI - EN 1008, che possono risultare dannose al conglomerato.

2.7.5 Miscela di aggregati

La curva granulometrica di progetto che si andrà ad ottenere deve essere compresa nel fuso indicato dalla seguente tabella:

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

Tabella 2.5 - Fuso granulometrico

2.7.6 Studio della miscela

Per determinare la curva granulometrica di progetto si fa riferimento al mix design di laboratorio che permette di considerare l'eventuale integrazione di aggregati e le percentuali ottimali di emulsione bituminosa, cemento e acqua. Si individua il corretto contenuto di acqua nella miscela granulare con il 2% in peso di cemento, seguendo le indicazioni della *Tabella 2.6*.

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

Tabella 2.6 - Contenuto ottimale di acqua con 2% di cemento

Per la compattazione, eseguita mediante pressa a taglio giratoria, è previsto l'utilizzo delle caratteristiche di seguito elencate (conformi alla normativa UNI - EN 12697-31):

- Tipo di fustella: NON drenata
- Angolo di rotazione: $1.25^\circ \pm 0.02^\circ$
- Velocità di rotazione: 30 giri al minuto
- Pressione verticale: 600 kPa
- Diametro provino: 150 mm
- N° giri: 100

Qualora gli elementi più grossolani impediscano la produzione di provini geometricamente regolari è possibile eliminare il trattenuto al setaccio da 20 mm.

I provini vengono pesati prima e dopo la compattazione per la determinazione della quantità di acqua espulsa e successivamente essiccati in stufa a 40°C fino a peso costante. La

percentuale ottimale di acqua è quella che permette di raggiungere il valore più elevato di massa volumica della miscela secca (UNI EN 12697-6/procedura D) e un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione minore dello 0,5%.

Una volta individuato il corretto contenuto di acqua, i provini vengono confezionati mediante la stessa procedura di compattazione, ma con differenti quantità (percentuali riferite al peso degli inerti) di cemento ed emulsione bituminosa come indicato nella *Tabella 2.7*.

Acqua [%]	Contenuto ottimale								
	1,5			2,0			2,5		
Cemento [%]									
Emulsione bituminosa [%]	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0
Provini [n°]	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tabella 2.7 - Confezionamento dei provini in base alle diverse percentuali di cemento e di emulsione bituminosa

Per un corretto studio della miscela è importante considerare anche l'acqua apportata dall'emulsione.

Sui provini confezionati con le miscele che soddisfano i requisiti di resistenza a trazione indiretta, maturati per 72 ore a 40 °C, si deve determinare il modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (spostamento orizzontale imposto $5 \pm 0.2 \mu\text{m}$) secondo la Norma UNI EN 12697/26. La miscela ottimale 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 ottimale 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 (fino, grosso e 16-20); filler di recupero; cemento; acqua; emulsioni bituminose (normale, modificata SBS e con Lattice).

3.1 RAP

Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavements), anche noto come fresato, come anticipato nel precedente capitolo, è il materiale di risulta proveniente dalla fresatura degli strati legati delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Esso è composto da aggregati lapidei che presentano una curva granulometrica caratterizzata da un'elevata percentuale di inerti di piccola pezzatura e bitume invecchiato.

Anche se spesso il termine *fresato* e RAP vengono utilizzati come sinonimi, essi presentano comunque delle differenze secondo quanto definito dalle Norme Tecniche d'Appalto Prestazionali [1]: col primo si intende il materiale prodotto dalla demolizione con macchine fresatrici a tamburo, preferibilmente a freddo o con un leggero preriscaldamento, invece col secondo si intende il materiale risultante dalla dismissione con qualsiasi mezzo e successiva frantumazione degli strati bituminosi delle pavimentazioni degradate.

L'utilizzo di questo materiale comporta non solo vantaggi "ecologistici" già citati ma anche "pratici ed economici" in quanto tende al risparmio sui costi dei materiali e delle apparecchiature nonché alla diminuzione dei tempi operativi con conseguente snellimento del traffico.

Tramite appositi studi è stato visto che la pavimentazione può essere reimpiegata per un numero minimo di volte pari a 3-4, in ogni caso strettamente dipendente dalla quantità e qualità dei materiali costituenti la miscela originaria.

I materiali si definiscono qualitativamente buoni quando un legante garantisce elevate prestazioni nel tempo soprattutto rispetto al traffico e agli agenti atmosferici e quando gli

inerti non producono troppi fini durante le operazioni di scarifica stradale. Il legante viene inoltre completamente riutilizzato e ad esso si aggiunge una piccola quantità di bitume contenente un rigenerante ottenendo dei risparmi anche sui prodotti di distillazione petrolifera, sui costi di trasporto e sui combustibili necessari al confezionamento del nuovo conglomerato.

Le tre pezzature di fresato utilizzate provengono dall'impianto In.Co.Bit. S.R.L. sito nel comune di Montesicuro (AN) ed è stato caratterizzato attraverso la prova di analisi granulometrica descritta dalla normativa UNI-EN 933-1. Questo materiale arriva in impianto intero e solo successivamente viene frazionato in fine e grosso; quest'ultimo, per l'attività di laboratorio da noi svolta, è stato poi risetacciato con un setaccio da 16 mm e uno da 20 mm per ottenere la pezzatura nota col termine 16-20 che serviva da correttore granulometrico.

Il RAP usato faceva riferimento a queste tre diverse tipologie: fino, grosso e 16-20. Per ciascuno di essi è stata effettuata un'analisi granulometrica a diverse ripetizioni con lo scopo di ottenere risultati più attendibili. Sulla base dei risultati ottenuti (*Tabella 3.1*) si è andati a miscelare i tre materiali insieme (considerando anche il filler come si vedrà nel paragrafo 4) con lo scopo di ottenere una curva granulometrica contenuta all'interno del fuso di Bolzano che possiamo vedere rappresentata nella *Figura 3.1*:

	FINO_Lucidi	GROSSO_Lucidi	16-20 IPOTETICO	Curva granulometrica di progetto
Setaccio/crivello	% passante	% passante	% passante	% passante
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	90,9	0,0	84,0
10	96,7	68,5	0,0	77,7
8	85,6	56,9	0,0	68,7
4	52,7	33,7	0,0	44,4
2	28,0	16,9	0,0	26,2
1	11,9	7,2	0,0	14,6
0,5	3,7	3,1	0,0	8,9
0,25	2,0	2,2	0,0	7,7
0,125	0,5	1,1	0,0	6,1
0,063	0,3	0,6	0,0	5,1
FONDO	0	0		

Tabella 3.1 - Analisi granulometrica RAP

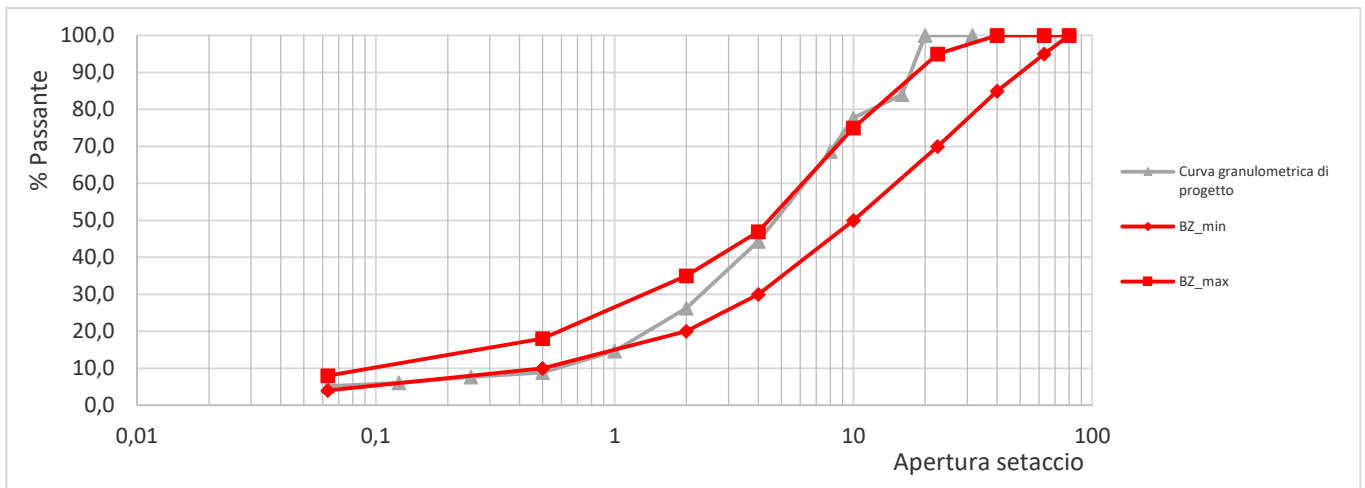


Figura 3.1 - Curva granulometrica RAP



Figura 3.2 - Campione di RAP fino



Figura 3.3 - Campione di RAP grosso



Figura 3.4 - Campione di RAP 16-20

3.2 Filler

Il filler può essere di recupero o minerale; nel primo caso esso proviene dai filtri dei fumi e dallo sgrossatore, nel secondo caso invece viene acquistato già selezionato dalla cava di provenienza. Quello da noi utilizzato è il filler di recupero di natura calcarea proveniente dall'impianto Sintexcal S.P.A. sito nel comune di Falconara Marittima ed è caratterizzato da dimensioni finissime (minori di 0.075 mm dalla CNR 139 e massima di 0.063 mm dalla UNI-EN 933-1); la sua funzione è quella di integrare la curva granulometrica e conferire una certa plasticità al conglomerato bituminoso. Gli aggregati calcarei hanno un comportamento basico e mostrano una maggiore affinità al bitume, quindi un'elevata adesione bitume-aggregato. Il silo di stoccaggio del filler è dotato di filtro a maniche per l'abbattimento delle polveri e quindi non sono presenti emissioni in atmosfera. Tutte le operazioni riguardanti il filler sono controllate dalla cabina centrale dallo stesso operatore che controlla tutte le altre fasi.

Lo studio preliminare della miscela è stato effettuato considerando i risultati ottenuti per il filler riportati nella seguente *Tabella 3.2*, graficati ed utilizzati per la determinazione della curva granulometrica precedentemente vista (*Figura 3.1*):

Setaccio/crivello	Filler di recupero % passante
31,5	100
20	100
16	100
10	100
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	100
0,25	99,1
0,125	92,4
0,063	79,3
FONDO	

Tabella 3.2 - Analisi granulometrica filler di recupero

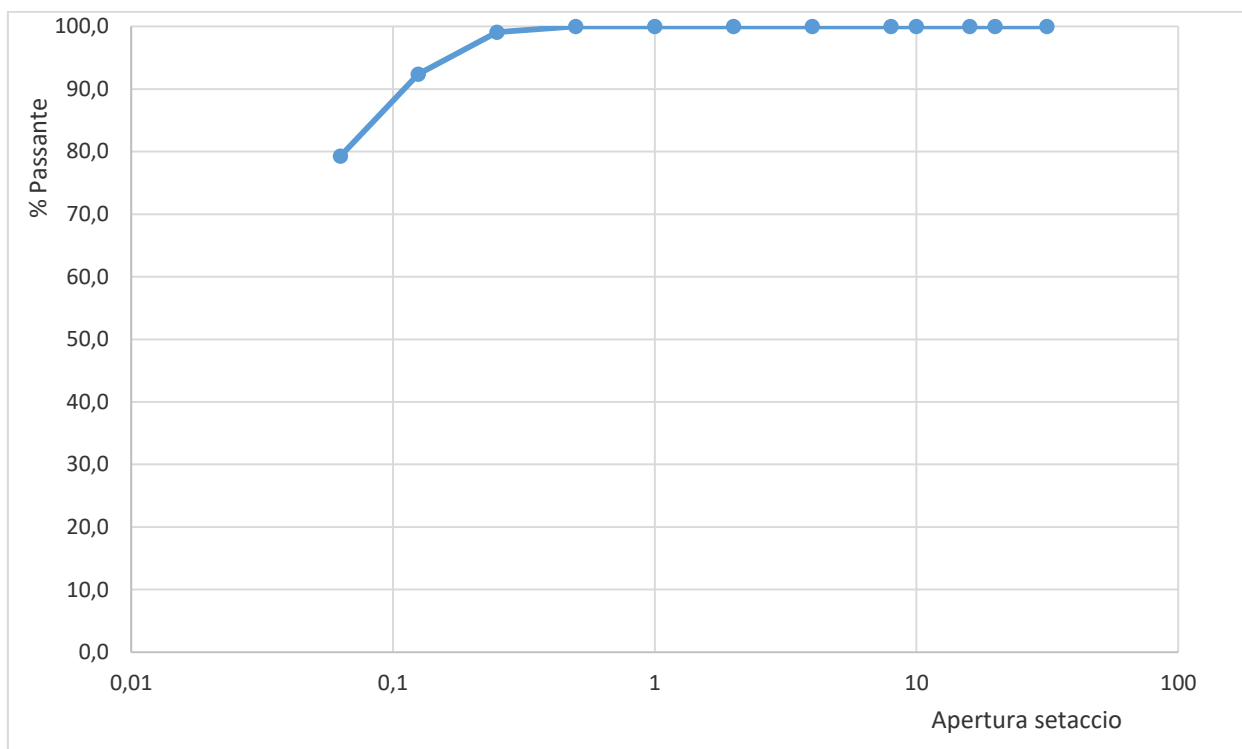


Figura 3.5 - Curva granulometrica Filler di recupero



Figura 3.6 - Filler di recupero

3.3 Emulsioni Bituminose

L'emulsione bituminosa è una sostanza composta da due liquidi: uno con funzione disperdente, che è l'acqua, e uno disperso sotto forma di goccioline, che è il bitume e viene impiegata per la realizzazione dei conglomerati per sopperire all'insufficienza di bitume invecchiato già presente nel RAP; questo invecchiamento, sia fisico che chimico, determina un aumento della viscosità e quindi una maggior fragilità, una diminuzione dell'indice di penetrazione ed un aumento della temperatura palla anello sperimentalmente verificati.

L'emulsione bituminosa, grazie alla presenza dell'acqua, garantisce un'adeguata lavorabilità in fase di miscelazione anche a temperatura ambiente, cosa che non accade con il bitume "puro" che invece dovrà essere riscaldato con annessi costi sia economici che ambientali.

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

A miscelazione avvenuta si andrà ad ottenere la "rottura" dell'emulsione che è quella fase in cui l'acqua al suo interno viene eliminata e il bitume riveste gli aggregati generando un incremento di viscosità e quindi una diminuzione di lavorabilità della miscela che complica anche le operazioni di costipamento. Proprio per questo motivo l'emulsione utilizzata deve essere adeguata ai materiali e la rottura deve avvenire dopo o durante la fase di compattazione.

La rottura dell'emulsione bituminosa avviene in tre fasi:

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

La velocità di rottura dipende da:

- ✓ Temperatura ambientale
- ✓ Temperatura dell'emulsione
- ✓ Dimensione delle particelle di bitume disperse
- ✓ Dimensione e natura degli inerti
- ✓ Modalità di miscelazione e compattazione.

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

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

La perdita di acqua e quindi il fenomeno della rottura avviene per evaporazione o assorbimento della stessa da parte degli aggregati, ma ci sono anche altri fattori che concorrono come: la coagulazione chimica tra emulsione e aggregato, i processi di miscelazione e costipamento e la composizione chimica dell'emulsione.

Il fenomeno della coagulazione chimica dipende dalla acidità o basicità dell'emulsione, infatti si definiscono due tipologie di emulsioni:

- Anioniche (basiche) dove gli ioni del globulo di bitume assumono carica polare negativa. Esse sono più economiche e facili da produrre, inoltre la rottura avviene solo chimicamente perciò necessita di prodotti chimici catalizzatori che consentano la separazione tra acqua e bitume dopo un certo intervallo di tempo. Queste emulsioni sono infatti le più utilizzate anche perché rispondono meglio alle esigenze tecniche.
- Cationiche (acide) dove gli ioni assumono carica positiva in fase acida.

Dopo la rottura avviene progressivamente la presa, ovvero fase in cui il bitume perde l'acqua rimasta all'interno e aderisce completamente agli inerti. Tuttavia è proprio in questa fase che l'emulsione presenta delle criticità nelle miscele a freddo, perché:

- Il rivestimento degli inerti non riesce ad essere omogeneo, specie nelle frazioni più grandi
- Il rivestimento ha inizio solo dopo la rottura dell'emulsione e le caratteristiche meccaniche necessarie vengono raggiunte dopo un periodo di maturazione, che in alcuni casi particolari può avvenire anche dopo mesi.

I vari tipi di emulsione vengono identificati univocamente attraverso apposita nomenclatura stabilita dalla normativa CEN nel modo seguente:

- 1° termine: Lettera C (cationica) o A (anionica)
- 2° termine: Numero corrispondente al contenuto in percentuale di legante bituminoso
- 3° termine: Lettera B (bitume)
- 4° termine: Lettera P (polimero) se è presente una modifica con polimeri
- 5° termine: Lettera F (flussante) se è presente in quantità maggiori al 2%
- 6° termine: Numero da 2 a 6 che indica la classe di velocità di rottura, dove 2 indica una velocità di rottura molto rapida e 6 una velocità di rottura molto lenta.
- 7° termine: Lettera O se è sovrastabilizzata.

I codici formati da questi termini prendono il nome di designazione.

Nella sperimentazione effettuata si è andati a valutare le prestazioni della stessa miscela di riciclato a freddo variando la sola tipologia di emulsione, impiegandone quindi una normale, una modificata con polimeri SBS e una modificata con lattice.



Figura 3.7 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

3.3.1 Emulsione Normale – RIGEVAL MC

Questo tipo di emulsione si ottiene dal bitume distillato e viene solitamente utilizzata per realizzare misti granulari legati a calce e a cemento. Le miscele in cui tale emulsione viene impiegata possono contenere dosaggi più o meno elevati di fresato stradale e si realizzano con la tecnica del riciclaggio a freddo. Lo schema produttivo prevede la miscelazione in un mulino del bitume e di una soluzione acquosa composta da acqua e vari emulsionanti.

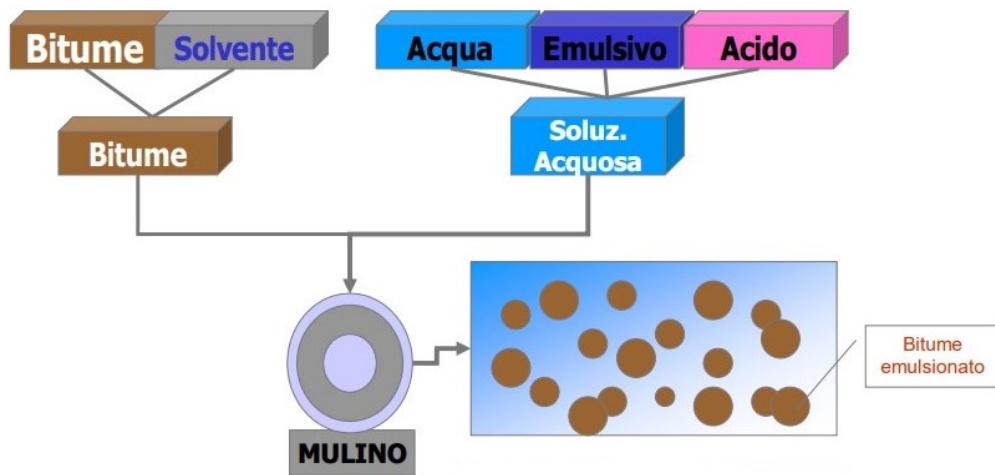


Figura 3.8 - Schema produttivo emulsioni di bitume distillato

È consigliato sia evitare di movimentare l'emulsione con agitatori a pale che riscaldare direttamente con fluidi a temperatura superiore a 100°C.

La fase di stoccaggio dovrà avvenire a temperature comprese tra i 10°C e i 70°C mentre la messa in opera a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C.

Nella sperimentazione eseguita è stata utilizzata l'emulsione RIGEVAL MC prodotta dalla ditta Valli Zabban. Di seguito viene presentata la scheda tecnica:

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

Caratteristiche dell'emulsione	Metodo	U.d.M.	Prestazione		Classe
			min	max	
Contenuto di legante	UNI EN 1428	%	58	62	6
Stabilità alla miscelazione con il cemento	UNI EN 12848	%		2	10
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm)	UNI EN 12846	sec	15	70	3
Adesività	UNI EN 13614	%	90		3
Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074)					
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		100	3
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	43		6

Figura 3.9 - Scheda tecnica emulsione normale RIGEVAL MC

3.3.2 Emulsione Modificata con Polimeri SBS – RIGEVAL CM

Questa emulsione è realizzata con bitume modificato ed utilizzata soprattutto in impianti fissi per produrre conglomerati bituminosi con la tecnica del riciclaggio a freddo, sfruttando RAP, cemento Portland e/o calce idrata. La modifica avviene miscelando bitume e polimero tramite dei mescolatori ad alto gradiente di taglio consentendone così l'omogenea dispersione nella massa. Solo in seguito si andrà ad aggiungere al bitume ed ai polimeri la soluzione acquosa che tramite miscelazione permette di ottenere l'emulsione bituminosa.

Questa miscela viene definita monofase in quanto caratterizzata da un'unica fase dispersa di goccioline di bitume modificato, inoltre tramite l'immissione di polimeri elastomerici SBS (stirene-butadiene-stirene) essa presenterà un miglior comportamento elastico e duttile, con conseguente aumento della deformazione, della sollecitazione e della resistenza a carichi ciclici.

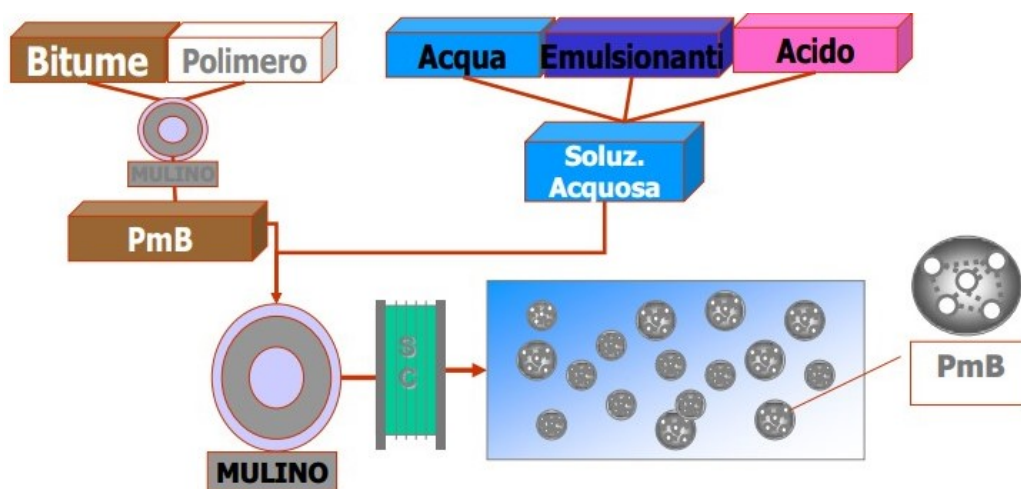


Figura 3.10 - Schema produttivo emulsioni di bitume modificato

Come per le emulsioni tradizionali, anche per quelle modificate è prevista una messa in opera a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C mentre lo stoccaggio deve avvenire tra i 10°C e i 70°C. La miscela necessita di essere movimentata periodicamente per rimuovere eventuali sedimenti, tuttavia è sconsigliato l'utilizzo di agitatori a pale, che potrebbero avere problemi in presenza di gelo.

Nella sperimentazione eseguita è stata utilizzata l'emulsione RIGIVAL CM prodotta dalla ditta Valli Zabban. Di seguito viene presentata la scheda tecnica:

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

Figura 3.11 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGIVAL CM

3.3.3 Emulsione Modificata con Lattice – RIGEVAL LX

L'emulsione modificata con lattice è definita bifase, cioè caratterizzata da una fase dispersa costituita da bitume e da lattice di gomma naturale o sintetico. A differenza delle emulsioni modificate con polimeri, qui il lattice (agente modificante), viene inserito nella soluzione acquosa, quindi senza l'ausilio di una fase intermedia di miscelazione.

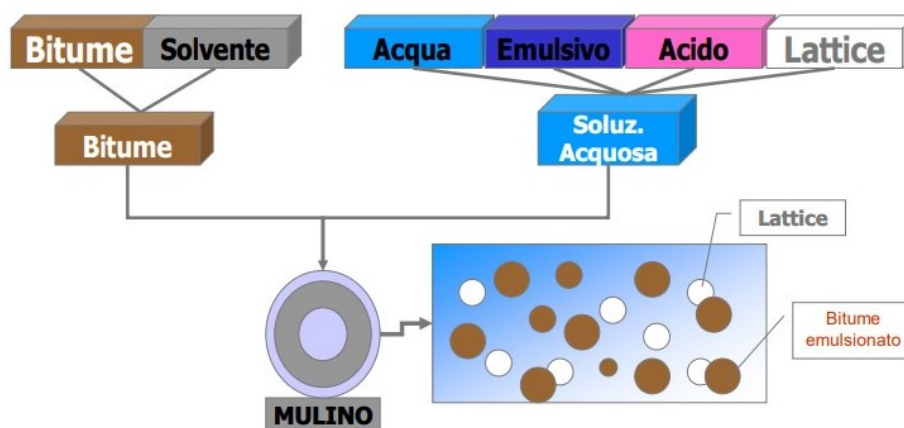


Figura 3.12 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

Il lattice è a sua volta costituito generalmente dal 65% di gomma e 35% d'acqua e questo influisce sul reale dosaggio dell'agente modificante all'interno dell'emulsione.

Il prodotto deve essere messo in opera a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C e lo stoccaggio deve avvenire tra i 10°C e i 70°C. La miscela necessita di essere movimentata periodicamente per rimuovere eventuali sedimenti, tuttavia è sconsigliato l'utilizzo di agitatori a pale, che potrebbero avere problemi in presenza di gelo.

Nella sperimentazione eseguita è stata utilizzata l'emulsione RIGEVAL LX prodotta dalla ditta Valli Zabban. Di seguito viene presentata la scheda tecnica:

Sito produttivo	Stabilimento di Bologna Stabilimento di Perugia	Via del Tragheto, 42 – 40100 Bologna Via della Valtiera, 101 – 06135 Collestrada
Designazione	C60BP10	
Descrizione del prodotto	Emulsione di bitume distillato e lattice SBR per conglomerati bituminosi riciclati a freddo	

Caratteristiche dell'emulsione	Metodo	U.d.M.	Prestazione		Classe
			min	max	
Contenuto di legante	UNI EN 1428	%	60		6
Contenuto di acqua	UNI EN 1428	%		40	6
Grado di acidità pH	UNI EN 12850		2,0	4,0	
Stabilità alla miscelazione con il cemento	UNI EN 12848	%		2	10
Sedimentazione a 7 giorni	UNI EN 12847	%		10	3
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm)	UNI EN 12846	sec	15	70	3
Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074)					
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	50	70	3
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	55		2
Fragilità alle basse temperature Punto di rottura Fraass	UNI EN 12593	°C	-10		5
Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C	UNI EN 13398	%	55		5

Figura 3.13 - Scheda tecnica emulsione con lattice RIGEVAL LX

3.4 Cemento Portland

Tramite studi e apposite sperimentazioni è stato visto come l'utilizzo di leganti idraulici (calce e/o cemento) nella realizzazione di miscele riciclate a freddo permette di raggiungere caratteristiche in esercizio migliori.

Nel riciclaggio a freddo il legante maggiormente impiegato è il cemento Portland, d'altoforno o pozzolanico, con classe di resistenza 325.



Figura 3.14 - Cemento Portland 32.5 R

Il cemento Portland, il più importante dei leganti idraulici, è una polvere fine prodotta riscaldando minerali di calcare e argilla in un forno per formare il clinker, quest'ultimo viene poi macinato e addizionato al 2-3% di gesso.

Nella presente sperimentazione si è impiegato il 2% di cemento in peso sugli inerti.

3.4.1 Idratazione, presa e indurimento

Nel momento in cui il cemento Portland viene miscelato con l'acqua si andrà ad ottenere una massa con consistenza plastico-fluida altamente deformabile e scorrevole a seconda del quantitativo d'acqua impiegato. In questa fase, la "pasta" (così viene chiamata la miscela di acqua e cemento) può essere: rimescolata, trasportata, introdotta all'interno di uno stampo assumendone la forma e compattata. Segue una fase di solidificazione che dà inizio al processo di presa con conseguente perdita di lavorabilità.

L'indurimento vero e proprio inizierà solamente dopo 24 ore e coincide con la trasformazione dell'impasto in una massa dotata di apprezzabile resistenza meccanica a compressione.

Le fasi del processo sono il risultato di un insieme di reazioni chimiche tra i costituenti del cemento e l'acqua d'impasto.



Figura 3.15 - Processo d'idratazione del cemento

La *Figura 3.15* rappresenta le fasi dell'idratazione del cemento nei tre stadi sopra descritti:

1. Idratazione: ha inizio subito dopo la miscelazione con acqua ed ha una durata di qualche decina di minuti;
2. Presa: si sviluppa in seguito alla formazione di ettringite e dura qualche ora;
3. Indurimento: inizia poco prima di un giorno in seguito allo sviluppo fibroso del prodotto idratato.

L'acquisizione delle caratteristiche prestazionali della miscela avviene solamente dopo il processo di indurimento ed è strettamente dipendente dal grado d'idratazione del cemento e dalla distanza originaria dei granuli, più specificatamente dal rapporto acqua/cemento nell'impasto.

3.4.1.1 Influenza della temperatura sull'idratazione del cemento

La fase di idratazione del cemento è fortemente dipendente dalla temperatura; in particolare modo quasi tutti i cementi vengono progettati in maniera tale che sviluppino le proprie caratteristiche prestazionali attese a temperature comprese circa tra 10°C e 30°C. Quando la temperatura si trova al di fuori di questo range, sia la presa che l'indurimento risultano sensibilmente modificati così come le prestazioni attese. Più in dettaglio, come possiamo notare anche dall'osservazione della seguente figura:

- l'aumento della temperatura provoca una riduzione dei tempi di presa;
- per temperature superiori ai 30°C si andrà ad ottenere una rapida idratazione del conglomerato cementizio determinando un incremento prestazionale alle brevi stagionature ed un decremento a quelle lunghe;

- al contrario di quanto detto nel precedente punto, le basse temperature generano una maturazione più lenta e minori resistenze alle brevi stagionature con il vantaggio di ottenere prestazioni migliori per lunghe stagionature.

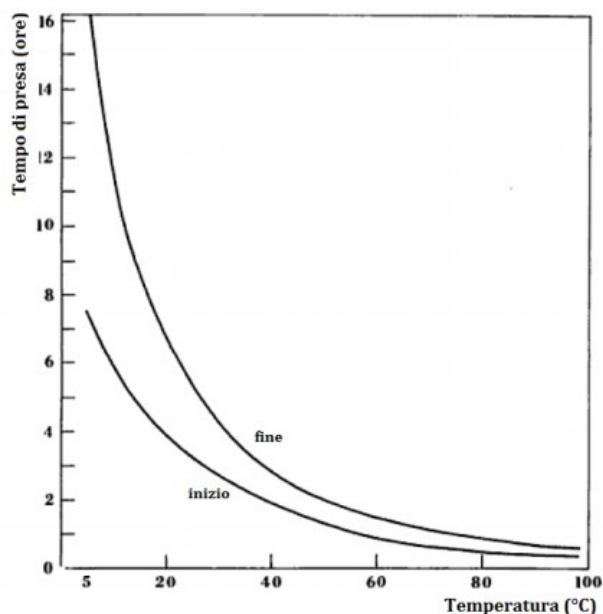


Figura 3.16 - Influenza della temperatura sui tempi iniziali e finali di presa

3.4.2 Proprietà e ruolo del cemento nella pavimentazione

A seconda del ruolo che la miscela ha nel pacchetto stradale, il cemento può essere utilizzato sia per le caratteristiche che è in grado di sviluppare a contatto con l'acqua dell'emulsione e con quella di aggiunta, che come filler per completare la curva granulometrica.

Le percentuali d'impiego variano a seconda dello strato da realizzare ed è compreso nell'ordine del 1-3% sulla massa degli aggregati, nel caso dei conglomerati bituminosi. Molto importante è evitare l'impiego di dosaggi troppo elevati che andrebbero ad avvicinare le caratteristiche di un conglomerato bituminoso a quelle di un misto cementato.

Come già accennato, le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche delle miscele sono dipendenti dai processi di idratazione e presa del cemento. L'obiettivo è quello di aumentare la resistenza del conglomerato mediante l'impiego di un certo quantitativo di sostanza stabilizzante aggiunta che però, come contro, varia in base al tipo di materiale trattato. Tuttavia, è importante tenere a mente che un dosaggio sempre maggiore di cemento, aumenta sì la resistenza ma può ridurre le prestazioni dello strato e renderlo ancora più friabile, perciò la miscela presenta una diminuzione delle proprie caratteristiche a fatica. Tale

situazione favorirà la formazione di incrinature indotta dalle continue sollecitazioni dovute al carico esercitato dagli automezzi che rappresentano, ovviamente, una caratteristica negativa per lo strato di una pavimentazione stradale.

Un ruolo fondamentale nelle miscele riciclate a freddo con emulsione, per la presenza di cemento, è svolto dall'acqua in particolar modo dal suo quantitativo nell'impasto. L'importanza di questa componente è data da due differenti motivazioni:

- innanzitutto è necessaria per la fase di idratazione e quindi l'attivazione del cemento, nel caso in cui essa non sia presente, il cemento si comporterebbe come un semplice filler inerte;
- essa insieme all'emulsione bituminosa fornisce una situazione favorevole nella quale l'idratazione sottrae acqua all'impasto e la reazione esotermica produce calore, favorendo la rottura dell'emulsione da un lato e la presa dall'altro. Quindi il cemento è importante anche come agente di adesione per il legante nelle miscele bituminose a base di emulsione.

3.5 Acqua

Nella realizzazione di miscele in conglomerato bituminoso l'acqua gioca un ruolo chiave, perciò, è necessario fare attenzione a quella che si sceglie di impiegare, che dovrà essere esente da impurità, sia in soluzione che in sospensione. Questo perché le impurità potrebbero influire negativamente sui processi necessari per la maturazione della miscela e possono anche alterarne le proprietà.

Se il dosaggio di acqua adottato (solitamente compreso tra il 5-7% rispetto alla massa di fresato) risulta essere o meno giusto viene verificato tramite prove di costipamento in maniera tale da ottenere una densità ottimale.

L'acqua contenuta dalla miscela deriva:

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

- dall'umidità del fresato, estremamente variabile a seconda delle condizioni atmosferiche.

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

L'importanza del ruolo svolto dall'acqua, come precedentemente esposto nel paragrafo 2.6.5, è data dal fatto che ne determina: l'addensabilità e la lavorabilità della miscela, i meccanismi di rottura dell'emulsione, la presa e l'indurimento della frazione cementizia ed i tempi di riapertura al traffico. Da ciascuna di queste situazioni è stato possibile evincere come il suo dosaggio non deve essere né troppo alto, né tantomeno troppo basso perciò l'acqua dovrà essere impiegata con la sua giusta quantità al fine di ottenere migliori livelli prestazionali della miscela sia in fase produttiva che esecutiva.

Nella presente sperimentazione si è impiegato il 5% di acqua sul peso sugli aggregati.

Capitolo 4 - Test Methods e Programma Sperimentale

In questo capitolo andremo a descrivere il programma sperimentale con i relativi obiettivi, le apparecchiature usate, le metodologie di prova eseguite e le miscele oggetto di studio.

4.1 Obiettivo della sperimentazione

L'indagine sperimentale proposta in questa tesi è stata condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura – Sezione Infrastrutture – Area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche. La ricerca è stata eseguita mediante prove di laboratorio su tre miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo, preparate con differenti tipologie di emulsione bituminosa (normale, modificata con polimeri SBS e modificata con lattice) e con gli stessi dosaggi dei vari materiali componenti. Tale studio è stato svolto al fine di determinare quali tra le diverse emulsioni permettevano ai campioni di raggiungere la caratterizzazione fisica e meccanica rispondente al Capitolato Speciale d'appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano.

4.2 Apparecchiature e protocolli di prova

In questo paragrafo vengono riportate tutte le metodologie di prova utilizzate durante la sperimentazione.

4.2.1 Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è una prova di laboratorio che permette di valutare la distribuzione delle dimensioni degli aggregati che compongono una miscela e dovrà essere eseguita in conformità alla UNI-EN 933-1. Tale analisi è effettuata per l'influenza che la granulometria degli inerti esercita su lavorabilità, proprietà volumetriche, durabilità, grado di compattezza e risposta meccanica del conglomerato bituminoso. Si tratta di una procedura che prevede la

vagliatura del materiale tramite una serie di setacci. Un setaccio può essere a maglia circolare o quadrata ed è caratterizzato da una determinata apertura delle maglie.



Figura 4.1 – Setacci a maglia quadrata e circolare

I setacci sono impilati e disposti con apertura decrescente dall'alto verso il basso. Il materiale viene posizionato in sommità e la pila viene agitata orizzontalmente, in questo modo i granuli di diverse dimensioni verranno bloccati al rispettivo setaccio. Il diametro dei singoli granuli corrisponde rispettivamente al diametro della maglia circolare o alla diagonale della maglia quadrata del setaccio che li trattiene. La pila è stata composta dai seguenti setacci:

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

Tabella 4.1 - Apertura setacci per analisi Granulometrica

Il materiale viene immesso in cima alla pila e quest'ultima viene posizionata in un vibro-vaglio meccanico che, generando un'oscillazione orizzontale per 10 minuti, permette di ottenere una corretta vagliatura.

Alla fine della vagliatura, il contenuto di ogni setaccio viene pesato: la quantità di materiale contenuta in un singolo setaccio corrisponde alla quantità di trattenuto parziale relativo a quel setaccio.



Figura 4.2 - Pila di setacci posizionata nel vibro-vaglio

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

Campione	Lucidi_grosso 5			
Setaccio/crivello	Trattenuti	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	263	9,3	9,3	90,7
10	609,8	21,5	30,8	69,2
8	341,7	12,1	42,9	57,1
4	672,6	23,7	66,6	33,4
2	483,8	17,1	83,7	16,3
1	260,2	9,2	92,9	7,1
0,5	115,8	4,1	97,0	3,0
0,25	28	1,0	98,0	2,0
0,125	28,8	1,0	99,0	1,0
0,063	14,2	0,5	99,5	0,5
FONDO	14,7	0,5	100	0

Tabella 4.2 - Esempio di calcolo delle percentuali di passante

Nella *Tabella 4.2* è riportata la quinta ripetizione di analisi granulometrica relativa al freato grosso utilizzato. Tale ripetizione è stata poi considerata tra le ultime tre per fare una media delle ripetizioni 3-4-5 con la quale si è determinati la seguente curva granulometrica:

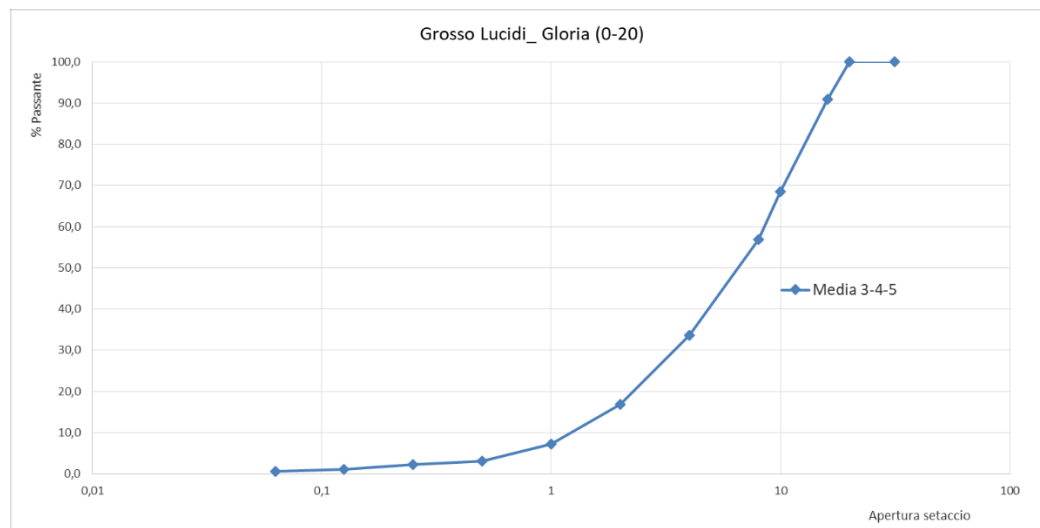


Figura 4.3 - Esempio di curva granulometrica

4.2.2 Massa volumica ed assorbimento degli aggregati

Per ottenere la massa volumica apparente e l'assorbimento d'acqua degli aggregati viene utilizzato il picnometro seguendo quanto riportato dalla normativa UNI-EN 1097-6. Il picnometro è uno strumento in vetro con un tappo dotato di capillare e un riferimento per definire il livello di liquido costante.



Figura 4.4 - Picnometro

La prima cosa da fare è lavare il quantitativo di materiale da sottoporre a tale procedura con lo scopo di eliminare la frazione fine passante al setaccio con apertura inferiore a 0.063 mm. Una volta lavato lo si fa asciugare e si inserisce nel picnometro.

Ogni picnometro viene poi riempito d'acqua fino a sommergere completamente il materiale. Per eliminare le bolle d'aria rimaste intrappolate, prima si agita prudentemente il picnometro mantenendolo in posizione inclinata poi si collega il picnometro ad una pompa sottovuoto, che si lascia agire per circa 20 minuti.



Figura 4.5 - Picnometro collegato alla pompa per sottovuoto

Eliminate le bolle d'aria, i picnometri vengono messi, insieme a delle bottiglie d'acqua, in camera climatica a 20°C per una notte ed il giorno seguente si sottopone nuovamente i picnometri alla pompa per sottovuoto per altri 15 – 20 minuti.

Si inserisce il tappo del contenitore e lo si va a riempire di acqua fino al livello costante che si trova sul tappo, si asciuga esternamente il picnometro, lo si posiziona su una bilancia di precisione per ottenere la massa $M2$ e, tramite un termometro ad ago, si verifica che la temperatura dell'acqua $T1$ sia $22 \pm 3^\circ\text{C}$.

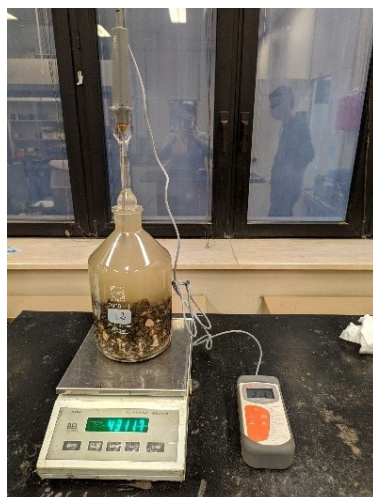


Figura 4.6 - Misura della temperatura T1

Dopo aver fatto defluire l'acqua dal picnometro, il materiale "intero" precedentemente utilizzato è stato poi setacciato in due differenti pezzature:

- da 4 mm a 31.5 mm → pezzatura grossa
- da 0.063 mm a 4 mm → pezzatura fine

Tale procedura è stata fatta perché da questo momento in poi essa proseguirà con due metodi diversi, descritti nei successivi paragrafi, a seconda della pezzatura del RAP che risulta essere fine e grossa.

4.2.2.1 Procedura per aggregati di pezzatura 4 mm – 31,5 mm

Gli aggregati grossi trattenuti dalla setacciatura vengono posizionati sopra un panno assorbente, disposto su di una teglia, e tamponati fino al raggiungimento della condizione di superficie satura asciutta (SSA) in cui l'aggregato deve essere umido ma non deve avere il film d'acqua sulla superficie.



Figura 4.7 - Materiale in condizioni di superficie satura

Si prende una teglia vuota, si misura la sua *tara1* e su di essa si andrà a versare il materiale in condizione SSA e andando a sottrarre al valore ottenuto la *tara1* della teglia si otterrà la massa *M1*. A questo punto la teglia viene inserita in un forno a 40°C e il giorno successivo si va a pesare nuovamente la teglia con il materiale e sottraendo il valore ottenuto alla *tara1* si ottiene la massa dell'aggregato asciutto *M4*.



Figura 4.8 - Forno

La massa *M3* si determina riempiendo il picnometro di acqua fino alla tacca di riferimento e la temperatura non deve variare più di 2°C da *T1*.

4.2.2.2 Procedura per aggregati di pezzatura 0,063 mm – 4 mm

Il trattenuto al setaccio da 0.063 mm viene posizionato in una teglia precedentemente tarata, quindi con misura della grandezza *tara1* (comprensiva anche dei tre attrezzi che verranno utilizzati) e viene messo in forno a 40°C per 30 minuti per togliere l'acqua in eccesso.

Questi attrezzi sono: un cono di metallo cavo (nel quale si dovrà collocare il materiale), un pestello (per sottoporlo a costipamento) ed una spatola.



Figura 4.9 - Teglia con materiale, spatola, pistone e cono

Tramite il pistone si danno 25 colpi sul materiale e togliendo il cono si dovrà ottenere la condizione di superficie satura asciutta che è quella in cui gli aggregati assumono la forma di un cono a punta come rappresentato nella seguente Figura 4.10.

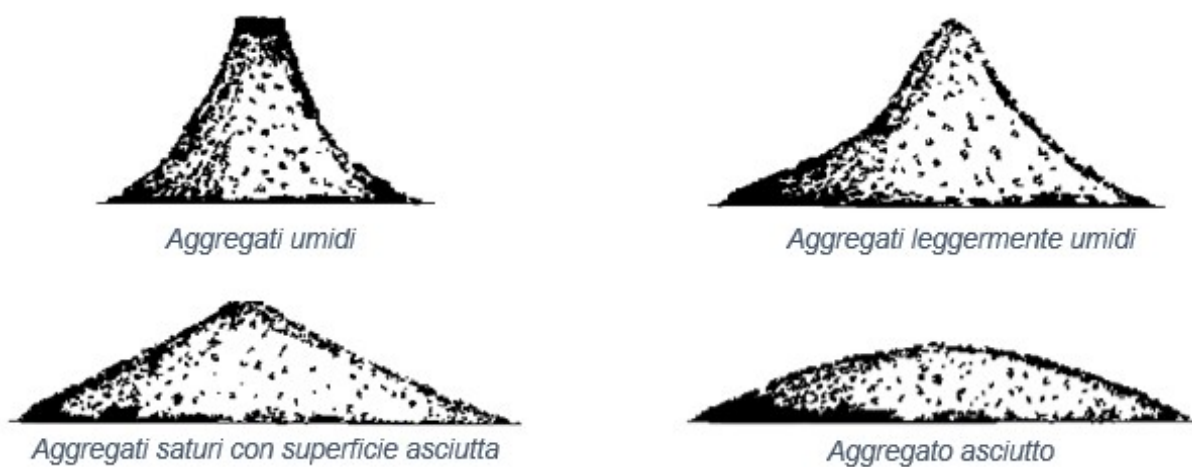


Figura 4.10 - Possibili configurazioni del materiale dopo la rimozione del cono

Una volta raggiunta la condizione SSA, la teglia con tutti gli utensili viene pesata e sottraendo la tara si ottiene $M1$. A questo punto la teglia viene messa in forno e dopo un giorno pesata nuovamente ottenendo $M4$. Riempiendo il picnometro con acqua, la cui temperatura non deve variare più di 2°C da $T1$, si ottiene la massa $M3$.

Infine per entrambe le pezzature si calcolano le masse volumiche e l'assorbimento dell'acqua con l'utilizzo delle seguenti formule:

- 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 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/m ³
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tabella 4.3 - Massa volumica dell'acqua in funzione della temperatura

4.2.2.3 Elaborazione dei dati del picnometro

I parametri valutati durante l'esecuzione della prova del picnometro, descritta nel paragrafo 4.2.2, sono di seguito elencati:

- M1: massa degli aggregati in condizioni di superficie satura asciutta;
- M2: massa del picnometro, degli aggregati e dell'acqua fino al menisco;
- M3: massa del picnometro pieno d'acqua. La temperatura dell'acqua non deve differire più di 2°C da T1;
- M4: massa netta dell'aggregato asciutto post essiccazione nel forno

- T1: temperatura dell'acqua in corrispondenza della pesata M2. La temperatura dell'acqua deve essere compresa tra 19 e 25°C;
- ρ_w : massa volumica dell'acqua a T1.

Successivamente sono riportati i risultati della prova.

- ρ_{RD} : massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa
- ρ_{SSD} : massa volumica dei granuli in condizione SSA
- ρ_a : massa volumica apparente dei granuli
- WA₂₄: assorbimento dell'acqua

I valori ottenuti di massa volumica apparente dei granuli e di assorbimento d'acqua degli aggregati stabiliti secondo la procedura descritta nel paragrafo 4.2.2 sono di seguito riportati.

1) RAP gruppo LUCIDI fino (ripetizione 1)

T1	21,8
Tinf	21
$\rho_{w\text{inf}}$ [g/cm ³]	998,1
Tsup	22
$\rho_{w\text{sup}}$ [g/cm ³]	997,8
ρ_w [g/cm ³]	997,86

M1 [g]	3746,1
M2 [g]	3549,8
M3 [g]	328,4
T1 [°C]	21,8
ρ_w [g/cm ³]	0,99786
ρ_A [g/cm ³]	2,480675
WA24	1,2

Tabella 4.4 - Elaborazione picnometro pezzatura fina gruppo LUCIDI

2) RAP gruppo LUCIDI fino (Ripetizione 2)

T1	22,3
Tinf	22
$\rho_{w\text{inf}}$ [g/cm ³]	997,8
Tsup	23
$\rho_{w\text{sup}}$ [g/cm ³]	997,6
ρ_w [g/cm ³]	997,74

M1 [g]	3819,2
M2 [g]	3549,8
M3 [g]	452,0
T1 [°C]	22,3
ρ_w [g/cm ³]	0,99774
ρ_A [g/cm ³]	2,469762
WA24	1,6

Tabella 4.5 - Elaborazione picnometro pezzatura fina gruppo LUCIDI

3) RAP gruppo LUCIDI grosso (Ripetizione 1)

T1	21,5
Tinf	22
ρ_{winf} [g/cm ³]	997,8
Tsup	22
ρ_{wsup} [g/cm ³]	997,8
ρ_w [g/cm ³]	997,80

M1 [g]	3581,7
M2 [g]	3188,5
M3 [g]	651,8
T1 [°C]	21,5
ρ_w [g/cm ³]	0,9978
ρ_A [g/cm ³]	2,51495
WA24	1,4

Tabella 4.6 - Elaborazione picnometro pezzatura grossa gruppo LUCIDI

4) RAP gruppo LUCIDI grosso (Ripetizione 2)

T1	22,5
Tinf	22
ρ_{winf} [g/cm ³]	997,8
Tsup	23
ρ_{wsup} [g/cm ³]	997,6
ρ_w [g/cm ³]	997,70

M2 [g]	3635,7
M3 [g]	3188,5
M4 [g]	743,4
T1 [°C]	22,5
ρ_w [g/cm ³]	0,9977
ρ_A [g/cm ³]	2,504018
WA24	1,8

Tabella 4.7 - Elaborazione picnometro pezzatura grossa gruppo LUCIDI

I valori di massa volumica apparente dei granuli ottenuti dalla media delle due ripetizioni sia per la pezzatura fine che grossa e quelli di assorbimento d'acqua adottati per ciascuna pezzatura sono di seguito riportati.

Name	ρ_a [g/cm ³]	Water absorption [%]
Fino (Lucidi)	2,459	1,40
Grosso (Lucidi)	2,502	1,60
Grosso (16-20)	2,558	1,80

Tabella 4.8 - Valori finali adottati per ciascuna pezzatura

4.2.3 Preparazione dei provini

Il confezionamento dei provini inizia dalla preparazione degli aggregati che deve essere effettuata il giorno prima della miscelazione in modo tale da permettere agli inerti di assorbire l'acqua. Il dosaggio in peso dei materiali, quali aggregati, filler, acqua, emulsione bituminosa e cemento, è stabilito tramite il mix design.



Figura 4.11 - Dosaggio degli aggregati secondo la ricetta stabilita

Di seguito viene riportato un esempio di ricetta:

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	Fino (Lucidi)	10461	10461
RA2	Grosso (Lucidi)	3415	3415
VA1	Grosso (16-20)	2465	2465
VA2	-	0	0
VA3	-	0	0
VA4	-	0	0
Filler	recupero	1059	1059
Water (abs)		245,5	245,5
Cement	C1-ref	348	348
Emulsion		696	696
Water di aggiunta		346	346
TOTAL		19035	19035
total for each specimen		2841,1	2841,1

Tabella 4.9 - Esempio di ricetta per la preparazione di un impasto

Una volta pesati con i rispettivi dosaggi, si posizionano fino, grosso e 16-20 all'interno di cassoni di plastica, si inserisce l'acqua di assorbimento prevista (water abs), si miscela il tutto manualmente ed infine si sigilla il cassone mediante l'utilizzo di un telo di plastica per evitare perdite di acqua. Inoltre si preparano preventivamente i quantitativi riportati nella ricetta di filler e cemento che dovranno poi essere inseriti nella successiva fase di miscelazione che avverrà il giorno dopo.



Figura 4.12 - Secchio di plastica sigillato

Essa prevede il rispetto dei seguenti passaggi:

1. Si inseriscono i materiali contenuti nei cassoni di plastica all'interno del miscelatore meccanico;



Figura 4.13 - Miscelatore meccanico



Figura 4.14 - Aggregati nel miscelatore

2. Viene aggiunto il filler e si attiva la miscelazione per 1 minuto;



Figura 4.15 - Aggregati e filler nel miscelatore

3. Si inserisce poi la metà del dosaggio previsto di cemento e si miscela per 1 minuto;



Figura 4.16 - Cemento nel miscelatore

4. Si versa l'altra metà rimanente del cemento e si ripete la miscelazione per 1 minuto;
5. Si pesa l'acqua di aggiunta prevista e se ne versa solamente la metà;



Figura 4.17 - Aggiunta di acqua

6. Si prende l'emulsione bituminosa, la si mischia e la si pesa poi si inserisce nel miscelatore che verrà azionato per 1 minuto;



Figura 4.18 - Aggiunta dell'emulsione bituminosa nel miscelatore

7. infine si versa l'altra metà di acqua e si mescola per l'ultimo minuto;



Figura 4.19 - Aggiunta della seconda metà di acqua nel miscelatore

Terminata la fase di miscelazione si versa l'impasto ottenuto nel cassone.



Figura 4.20 - Impasto a fine miscelazione



Figura 4.21 - Posizionamento impasto nel cassone

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

La pressa a taglio giratoria è un macchinario che permette il confezionamento di provini cilindrici in conglomerato bituminoso. Essa è composta da un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella, un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale, e un meccanismo rotante.



Figura 4.22 - Pressa a taglio giratoria

Essa permette di studiare l'addensamento, la lavorabilità e le caratteristiche volumetriche del conglomerato bituminoso nel rispetto della normativa di riferimento UNI-EN 12697-31. Tutto il sistema è gestito, grazie al collegamento con un computer, da un software chiamato "Tecnotest" che permette di impostare, tra le altre cose:

- il tipo di prova, cioè se a numero di giri imposto o ad altezza imposta;
- la pressione verticale;
- il diametro della fustella.

Inoltre registra anche l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro. Al diminuire dell'altezza aumenterà l'addensamento, fino ad un valore massimo caratteristico del materiale.



Figura 4.23 - Schermata iniziale del software

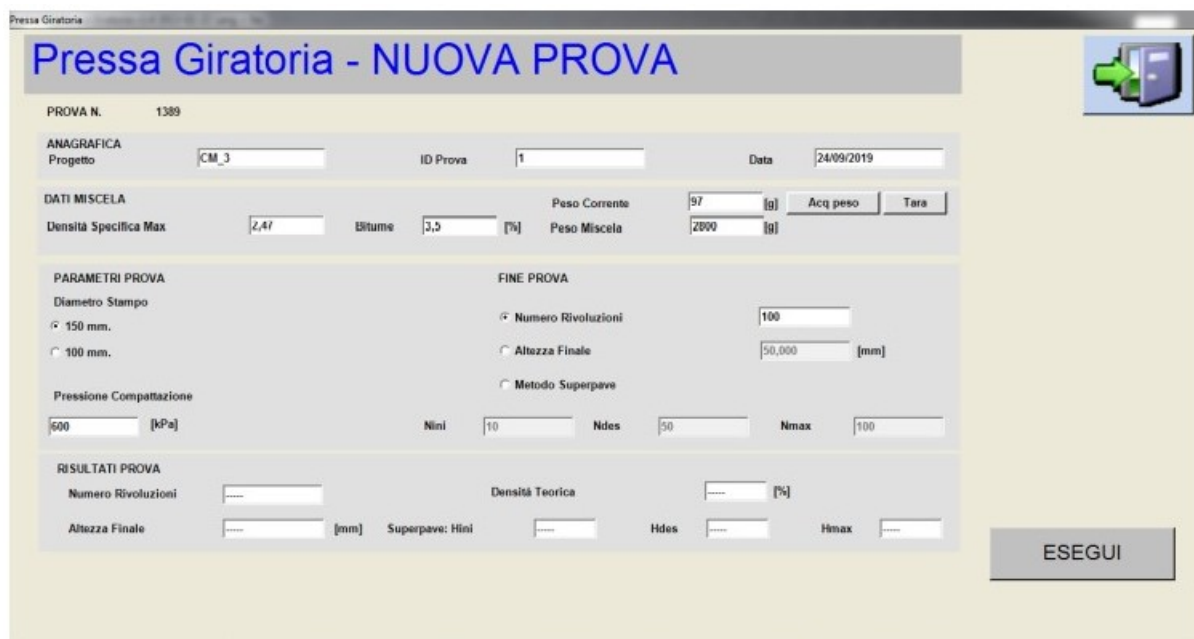


Figura 4.24 - Schermata principale pressa a taglio giratoria

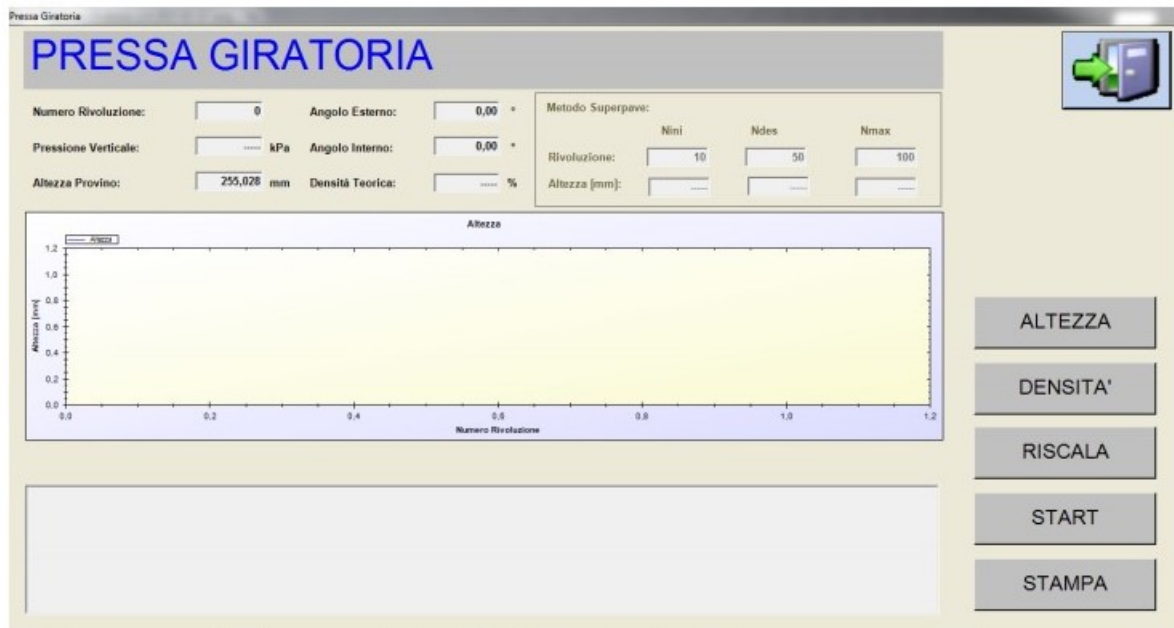


Figura 4.25 - Schermata di avvio prova

Di seguito vengono elencate le condizioni di prova necessarie alla compattazione dei provini e fornite in input al computer:

- Tipo di fustella: NON drenata
- Angolo di rotazione: 1.25°
- Velocità di rotazione: 30 giri al minuto
- Pressione verticale: 600 kPa
- Diametro provino: 150 mm (Figura 3.25)
- N° giri: 100



Figura 4.26 - Fustella con diametro 150 mm

Prima di inserire il materiale nella fustella si posiziona un disco di carta su una piastra infinitamente rigida, che costituisce la base della fustella, per evitare l'adesione del conglomerato sulla piastra. Segue poi l'introduzione dell'impasto per la realizzazione di provini per una quantità pari a 2841 g.



Figura 4.27 - Riciclato a freddo inserito nella fustella

Successivamente si lubrifica il piano di appoggio, il pistone, gli snodi e l'incasso della fustella con apposito grasso per evitare eventuali attriti che deve essere preceduta al posizionamento della fustella per l'esecuzione della compattazione.



Figura 4.28 - Lubrificazione del piano di appoggio

Eseguita questa fase la fustella può essere inserita nella macchina.



Figura 4.29 - Inserimento della fustella nella macchina

Avviata la prova il pistone scende e applica la pressione assiale; la fustella viene inclinata di $1,25^\circ$ 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.



Figura 4.30 - Prova di esecuzione

La prova si conclude con l'estrazione del provino grazie all'incastro della fustella nei supporti dell'estrattore e mediante l'utilizzo di un martinetto idraulico che va a sollevare la base infinitamente rigida provocandone la fuoriuscita del provino.



Figura 4.31 - Estrazione del provino

Nota l'altezza del provino registrata dal software ad ogni giro si ottiene la curva di compattazione. Da quest'ultima si calcola C_i , il grado di addensamento all' i -esima rotazione, in funzione di V_{m_i} , il contenuto dei vuoti relativi al numero di giri, mediante la seguente espressione:

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

Grazie ai dati ottenuti si è andati a costruire il grafico relativo alla curva di addensamento dove è riportato sull'asse delle ordinate i valori del grado di addensamento in scala aritmetica e sull'asse delle ascisse il numero di giri in scala logaritmica (Figura 4.32).

La relazione analitica che associa i parametri di lavorabilità è la seguente:

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

Con:

- $C_1 \rightarrow$ auto-addensamento della miscela;

- $k \rightarrow$ pendenza ed indica la lavorabilità cioè la capacità di compattazione e deformazione del conglomerato bituminoso sotto l'azione di una forza. Più questo parametro è alto più il materiale si compatta bene.

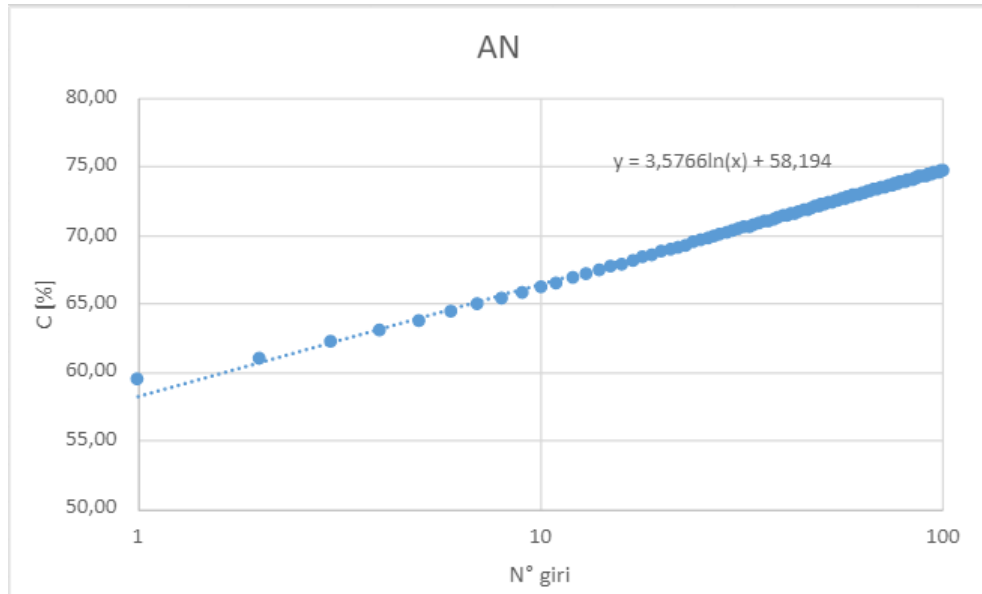


Figura 4.32 - Esempio di curva (n° giri; C) e relativa interpolazione con equazione della retta

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

Provino	C1 [mm]	k [l]
1	60,65	3,2122
2	61,113	3,3342
3	59,497	3,498
4	58,989	3,5417
5	59,181	3,4609
6	58,194	3,5766
media	59,604	3,437

Tabella 4.10 - Esempio di riepilogo dei coefficienti C1 e k nei provini di un impasto

Inoltre, durante la compattazione, vengono annotate le seguenti masse:

- Massa della fustella: $tara_1$
- Massa del disco di carta-filtro: $tara_2$
- Massa del vasetto: $tara_3$

- Massa di fustella, disco e materiale PRE compattazione: m_1
- Massa di fustella, disco e materiale POST compattazione: m_2
- Massa del provino e del vasetto: m_4

4.2.5 Determinazione delle proprietà volumetriche

Il comportamento del conglomerato bituminoso in fase di esercizio è strettamente legato alle proprietà volumetriche delle miscele. Quest'ultime sono costituite principalmente da tre componenti:

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

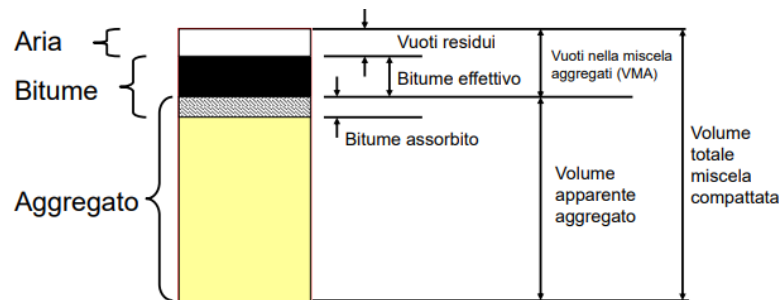


Figura 4.33 - Schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

I metodi per il calcolo numerico utilizzati per la determinazione della composizione volumetrica nella presente sperimentazione sono definiti in questo paragrafo dove si andrà a riportare la massa volumica massima, massa volumica apparente ed il volume dei vuoti.

4.2.5.1 Determinazione della massa volumica massima

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

$$\rho_m = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + (p_{a3}/\rho_{a3}) + (p_b/\rho_b) + (p_c/\rho_c) + (p_d/\rho_d)}$$

con:

- ρ_m : massa volumica massima della miscela in g/cm³;
- p_{a1}, p_{a2}, p_{a3} : percentuale degli aggregati nella miscela in g/g;
- $\rho_{a1}, \rho_{a2}, \rho_{a3}$: massa volumica apparente degli aggregati in g/cm³;
- p_b : percentuale del legante bituminoso nella miscela in g/g;
- ρ_b : massa volumica del legante bituminoso a 25 °C in g/cm³;
- p_c : percentuale del filler nella miscela in g/g;
- ρ_c : massa volumica del filler in g/cm³;
- p_d : percentuale del cemento nella miscela in g/g;
- ρ_d : massa volumica del cemento in g/cm³.

4.2.5.2 Determinazione della massa volumica apparente

La massa volumica apparente è la massa per unità di volume di un provino ad una temperatura di prova nota inclusi i vuoti d'aria. Nel presente elaborato è indicata con ρ_b ed è stata valutata utilizzando la procedura D (procedura geometrica) in accordo con la normativa UNI-EN 12697-6.

La procedura D prevede la determinazione della massa del campione secco (m_1) tramite la misurazione delle dimensioni del provino in millimetri. La massa volumica geometrica (ρ_{bgeom}) per provini cilindrici si calcola come segue:

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

con:

- 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

Il contenuto di vuoti residui dei provini compattati è stato determinato 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:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_{b,geom}}{\rho_m} \cdot 100$$

4.2.6 Prova di Modulo a Trazione Indiretta

Per la misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester) in accordo con la normativa UNI-EN 12697-26. Questa apparecchiatura consente di applicare un serie di carichi di compressione su almeno due diametri ($90^\circ \pm 2^\circ$) del provino cilindrico consentendo di ottenere la deformazione nella direzione ortogonale a quella di applicazione del carico tramite l'utilizzo di trasduttori.

Il NAT consente di simulare lo stato tensionale e deformativo cui è sottoposta la pavimentazione stradale al passaggio degli pneumatici. Il risultato di questa prova è l'ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus).



Figura 4.34 - Nottingham Asphalt Tester (NAT)

Il materiale si presuppone rimanga in campo elastico e quindi che sia omogeneo ed isotropo. Il comportamento del conglomerato bituminoso è di tipo visco-elasto-plastico ma poiché per temperature inferiori a 25°C il modulo di rigidezza a trazione è uguale a quello a compressione, il materiale si comporta come un mezzo elastico lineare.

La congruenza tra il modulo di rigidezza a compressione e trazione fa sì che il modulo del campione sia unico ed esclusivamente funzione dei seguenti parametri imposti tramite il software:

- geometria del provino;
- carico applicato;
- deformazione orizzontale fissata;
- coefficiente di Poisson;
- temperatura di prova;
- tempo di picco (rise-time).

Per fare in modo che il carico applicato sia conforme a quanto stabilito dalla normativa, la macchina possiede un sistema di gestione che permette, tramite una serie di colpi preliminare, di effettuare la taratura ed anche di assestare il carico sulla superficie del campione.

Lo stato di sollecitazione al quale è sottoposto il provino nel NAT è riportato nella seguente *Figura 4.35*.

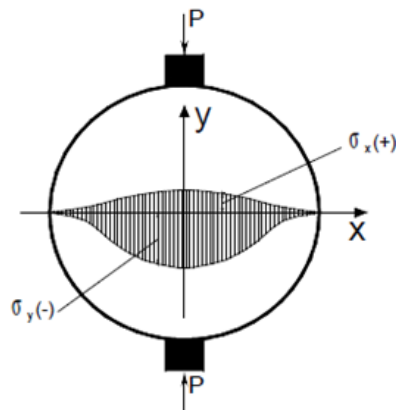


Figura 4.35 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

Per il calcolo delle sollecitazioni di trazione in direzione X e di compressione nella direzione Y medie e massime vengono utilizzate le seguenti formule:

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

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

con:

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

Tramite questa distribuzione teorica delle sollecitazioni, è possibile determinare il modulo di rigidezza elastico che può essere rappresentato in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale ϵ_x dell'elemento è:

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

con:

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

Dalle espressioni ricavate in precedenza, e considerando che Δ , deformazione orizzontale dei campioni, si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ha:

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

Si può così ricavare il modulo elastico del materiale, come indicato nella seguente equazione:

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

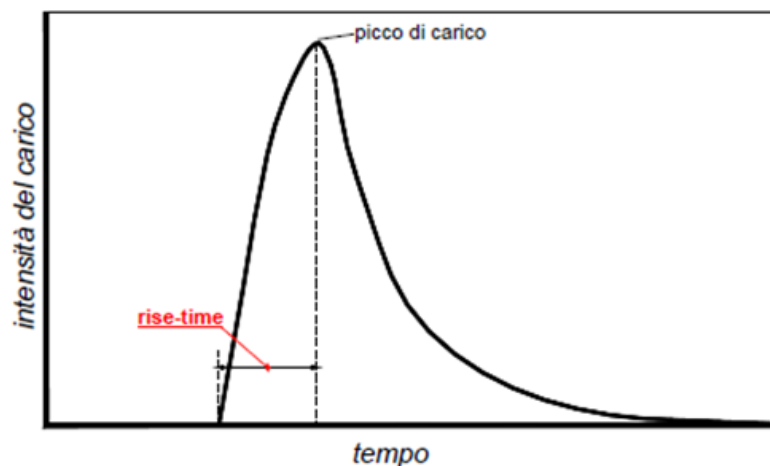


Figura 4.36 - Rappresentazione del rise-time di un carico di impulso

Il software utilizzato permette di ottenere un valore di modulo che viene corretto da un fattore AF (Adjustment Factor) che prende in considerazione la forma dell'onda di carico imposta, più precisamente entra in gioco 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 è compresa da 0.50 e 0.70. Il modulo di rigidezza corretto viene perciò calcolato con tale formula:

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

con:

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

I parametri che maggiormente influenzano il modulo sono: la temperatura, il rise-time, la deformazione orizzontale imposta ed il numero di colpi di condizionamento iniziale. Per quanto riguarda la *temperatura*, essa dovrà essere non superiore ai 25°C per garantire la validità della formula, quindi un modulo elastico uguale sia a compressione che a trazione; il *rise-time* invece per la natura viscoelastica del legante determina una forte dipendenza dei conglomerati dal tempo di applicazione del carico, più specificatamente fa riferimento al tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo. Nella presente campagna sperimentale la temperatura considerata è di 20°C mentre il rise-time è stato mantenuto costante e pari a 124 ms. La *deformazione orizzontale imposta* invece è importante perché, per il comportamento non lineare che posseggono i conglomerati, le loro proprietà meccaniche dipendono dalla deformazione imposta durante la prova mentre il numero di colpi di condizionamento iniziale precedentemente citati, dovranno essere di entità tale da ottenere parametri corretti di rigidezza. Nella presente trattazione si è adottato un numero pari a 10.

Il NAT è un macchinario posizionato all'interno di una camera climatica che permette il mantenimento del provino ad una temperatura costante (in questo caso pari a 20°C) e dotato di una cella di carico, un pistone e un dispositivo per il posizionamento dell'elemento oggetto di prova chiamato *castelletto* (Figura 4.37).

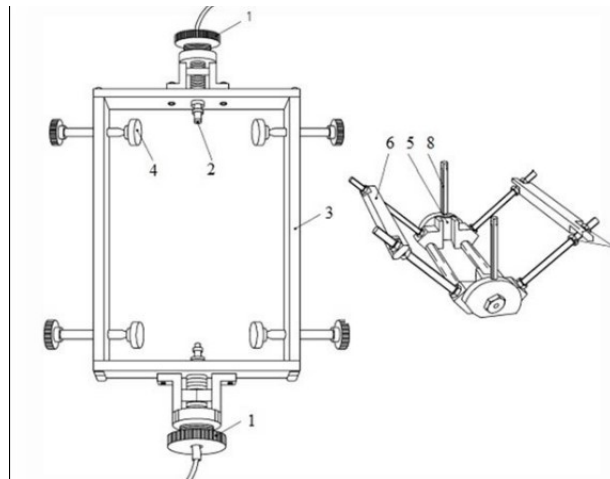


Figura 4.37 - Componenti del castelletto

Il provino viene posizionato inizialmente su questo *castelletto* (Figura 4.37); esso è caratterizzato da un telaio indicato col numero (3) sul quale si andrà, in una prima fase, a centrare il provino, una volta fissato con le viti (4) si andranno ad inserire i trasduttori (2) nei due fori guida e vengono spinti verso il provino fino ad arrivare a fondo corsa per poi fissarli mediante l'utilizzo delle due rotelle (1). Infine si va ad applicare la testa di carico e l'elemento è pronto per essere posizionato nella camera climatica.



Figura 4.38 - Provino montato sul castelletto e testa di carico applicata



Figura 4.39 - Provino posizionato nella macchina e trasduttori montati

Prima di iniziare la prova si dovranno alzare le barrette (8), inizialmente abbassate e necessarie a sostenere il provino nella fase preliminare di posizionamento, in modo tale da evitare la rottura dello stesso.



Figura 4.40 - Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

I provini da testare devono essere, preliminarmente all'esecuzione della prova, condizionati termicamente alla temperatura desiderata per un tempo sufficiente a garantire il raggiungimento della tale anche all'interno del materiale con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0.4°C.

Grazie al collegamento dei trasduttori ad un computer è possibile acquisire i vari dati, registrare i minimi spostamenti ed ottenere la deformazione nella direzione ortogonale a quella di applicazione del carico.

A tal proposito i parametri in input che dovranno essere forniti al software sono i seguenti:

1. Test temperature [°C]: temperatura di prova (pari a 20°C nella presente sperimentazione);
2. Specimen diameter [mm]: diametro del provino (nel nostro caso di 150 mm);
3. Specimen thickness [mm]: altezza del provino (definita come la media tra le quattro altezze misurate con apposito calibro);
4. Poisson's ratio: coefficiente di Poisson (assunto pari a 0,30 per i conglomerati riciclati a freddo come descritto dalla normativa);
5. Target rise-time [ms]: tempo che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario per raggiungere la deformazione indicata (nella sperimentazione il rise-time è pari a 124 ms);
6. Target horizontal deformation [μm]: deformazione orizzontale che la macchina deve far raggiungere al provino (nella sperimentazione si impone una deformazione orizzontale di 2 μm);
7. Number of conditioning pulses: numero di impulsi di precarico utili alla macchina per auto-calibrarsi in modo da far raggiungere al provino la deformazione imposta (nella sperimentazione le prove sono state eseguite con 10 colpi di condizionamento).

Figura 4.41 - Schermata iniziale del software ITSM con dati input

Cliccando sul tasto Continue si aprirà una nuova schermata rappresentata nella Figura 4.42 dove vanno inseriti i dati di prova, colui che la esegue, il metodo di produzione della prova, ecc.

Figura 4.42 - Seconda schermata

Successivamente, premendo sempre sul tasto Continue, si andrà ad ottenere una nuova pagina che è quella di *Figura 4.43*. Su di essa è possibile controllare direttamente il pistone pneumatico che verrà fatto scendere sulla testa di carico cliccando su Make Contact applicando così una forza di pre-carico sul provino di circa 30 N.

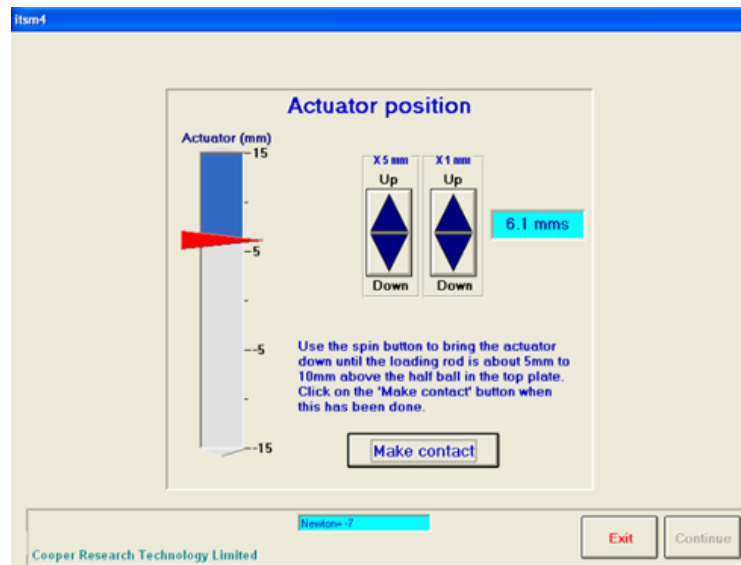


Figura 4.43 - Schermata con il comando "Make contact"

Raggiunto il contatto tra i due elementi si genera l'apertura automatica della schermata di *Figura 4.44*, utile al controllo dei trasduttori che verranno regolati agendo sulle due rotelle finché le freccette non diventano rosse come in *Figura 4.45*, a quel punto significa che i trasduttori sono posizionati correttamente per misurare la deformazione. In caso contrario essi andrebbero a misurare una deformazione non reale del provino con conseguente applicazione del carico e auto-calibrazione errate ed il test non è più valido.

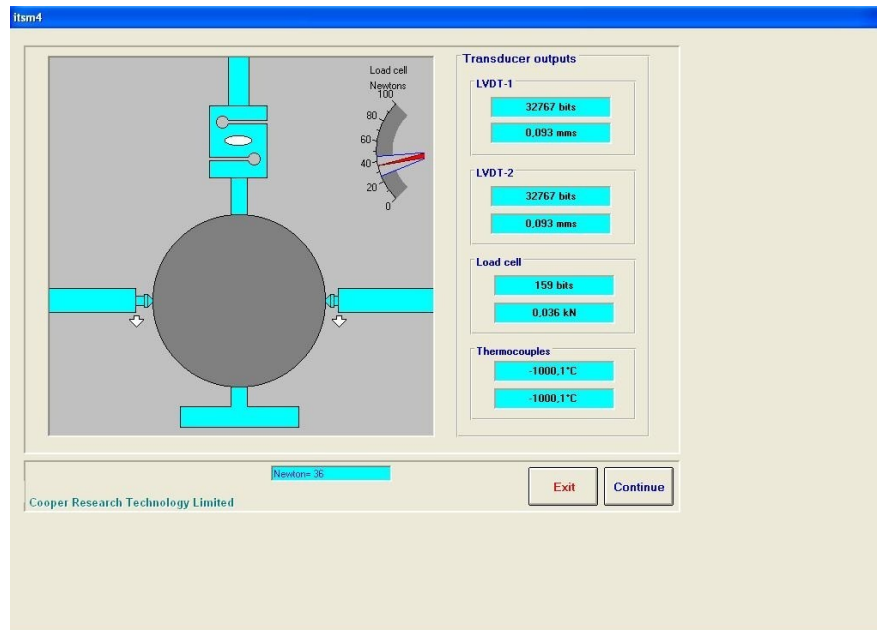


Figura 4.44 - Schermata prima della regolazione dei trasduttori

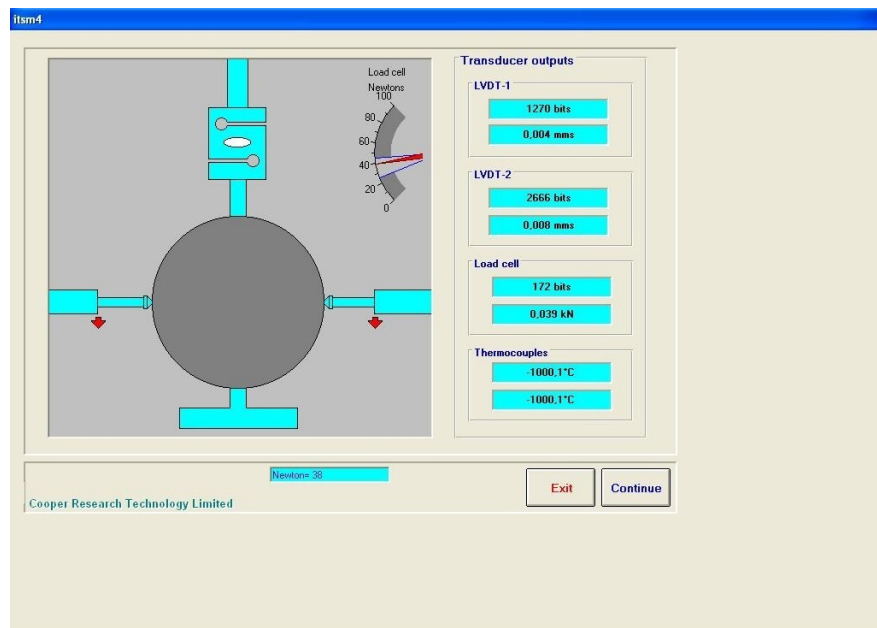


Figura 4.45 - Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

Una volta che i trasduttori sono in posizione corretta si dovrà verificare che la temperatura interna alla cella climatica non sia aumentata più di 0.5°C rispetto alla temperatura di prova prevista. Accertata tale condizione, si clicca su Continue e si passa alla schermata visualizzata in Figura 4.46 dove si applicano i 10 impulsi di pre-carico e si visualizzato i relativi dati.

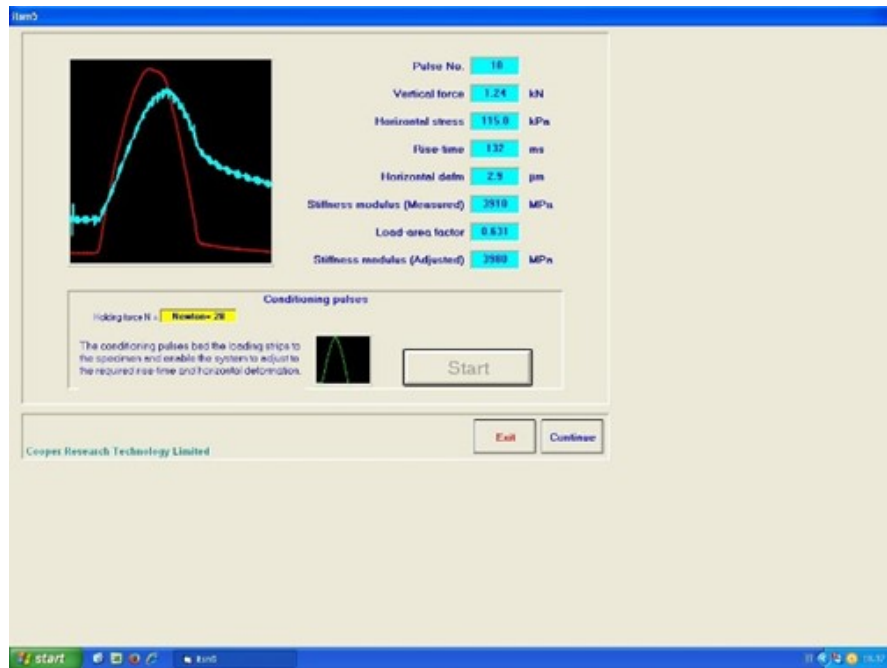


Figura 4.46 - Schermata degli impulsi pre-carico

Dopodiché cliccando nuovamente su Continue si arriva alla schermata finale, *Figura 4.47*, dove vengono riportati i parametri precedentemente descritti per ciascuno dei 5 impulsi di prova applicati con i relativi valori medi.

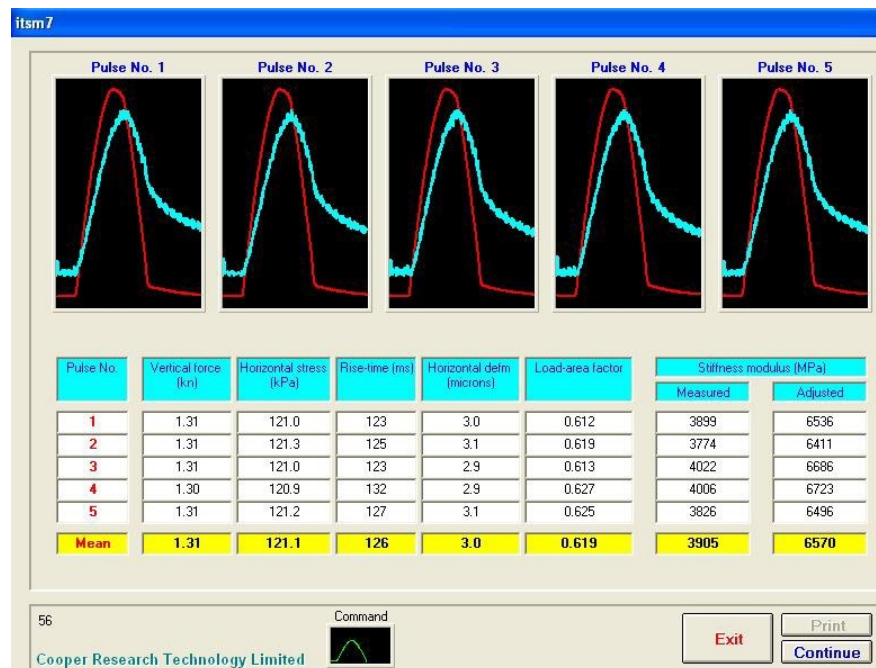


Figura 4.47 - Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Terminata questa procedura il software richiede la rotazione del provino di un angolo pari a $90^\circ \pm 10^\circ$ e si procede nuovamente con i passaggi precedentemente descritti. Noti i due valori

di modulo a trazione indiretta sui due diametri, essi non dovranno differire più del 20% tra loro e l'ITSM preso in considerazione non sarà altro che la loro media.

4.2.7 Prova di Trazione Indiretta

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova Brasiliana, viene realizzata comprimendo un provino lungo una diagonale verticale fino alla sua rottura con lo scopo di valutare la massima tensione di trazione che esso è in grado di sopportare noto come ITS (Indirect Tensile Strength). Tale parametro è importante per valutare la qualità e l'accettabilità delle miscele secondo quanto definito dalla normativa UNI-EN 12697-23; quest'ultima stabilisce che la prova deve essere effettuata ad una temperatura compresa tra i 5°C ed i 25°C. In questa indagine i provini sono stati pre-condizionati in camera climatica a 25°C per 4 ore.



Figura 4.48 - Camera climatica a 25°C

L'apparecchiatura di prova utilizzata presenta un sistema di carico con due piatti paralleli infinitamente rigidi. Le sollecitazioni vengono trasmesse al provino mediante due listelli di larghezza 15 ± 2 mm, spessore 4 ± 1 mm e lunghezza maggiore della linea di contatto col provino. Quest'ultimo verrà posizionato tra i piatti della pressa in modo tale da risultare centrato rispetto ai due listelli.



Figura 4.49 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

La testa di carico inferiore avanza ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. Il macchinario, durante l'applicazione della sollecitazione, consente di registrare la deformazione di trazione, ed il carico di rottura a compressione.

La Figura 4.50 mostra il risultato di una prova a trazione indiretta.



Figura 4.50 - Provino rotto dopo la prova

Il software utilizzato per il controllo dell'apparecchiatura e il successivo ottenimento dei risultati è UTMII su cui si imposta il diametro del provino, l'altezza, la velocità di avanzamento ed il carico di fine prova sulla base dei quali il programma fornisce:

- 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.

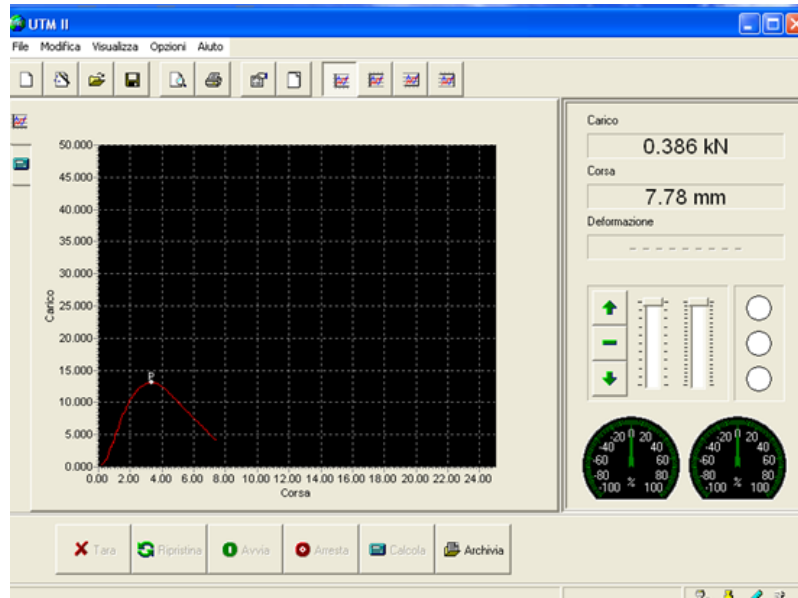


Figura 4.51 - Curva sforzo-deformazione risultante dell'applicazione del carico assiale

In tal modo il software andrà ad elaborare il corrispettivo valore di resistenza a trazione ITS (Figura 4.52).

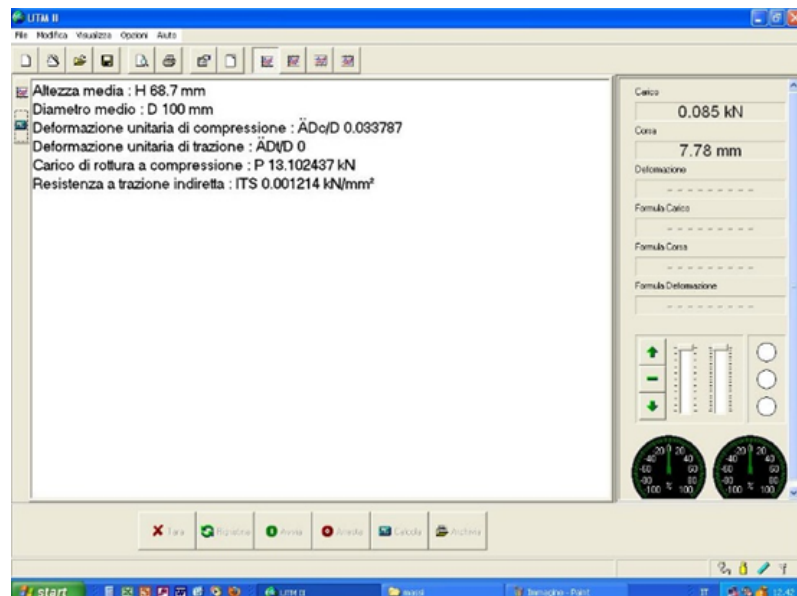


Figura 4.52 - Schermata con rielaborazione dei risultati

La formula che permette di ottenere l'ITS, cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, è la seguente:

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

con:

- P_{\max} : carico massimo espresso in N;
- t : altezza del provino espressa in mm;
- D : diametro del provino in mm.



Figura 4.53 - Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

4.2.7.1 Sensibilità all'acqua

Nella presente sperimentazione si è anche valutata la sensibilità all'acqua delle miscele comparando i dati di rottura di un provino "asciutto" con quelli di un provino "bagnato".

Questo tipo di verifica deve essere effettuata 14 giorni dopo il confezionamento dei provini e dovrà essere eseguita disponendo:

- 3 provini a 25°C all'aria per 3 giorni più 4 ore sempre a 25°C;
- 3 provini in bagno termostatico a 40°C per 3 giorni e poi 4 ore in bagno termostatico a 25°C.

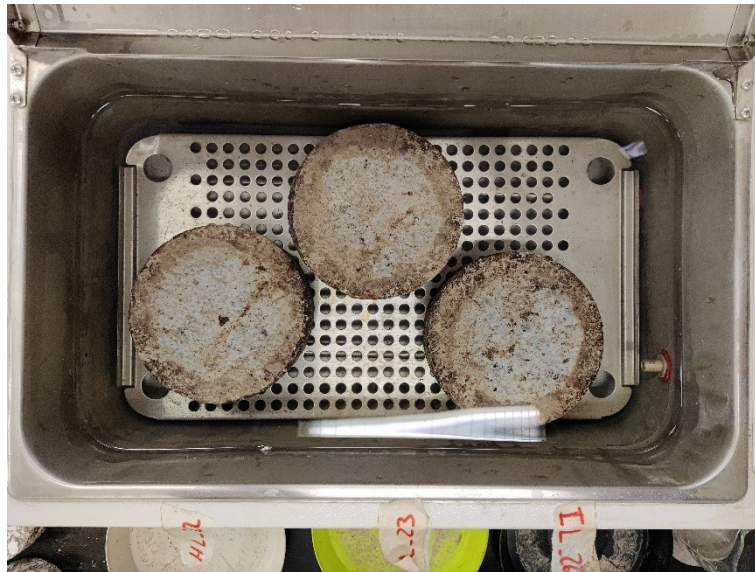


Figura 4.54 - Bagno termostatico

Dopo questo condizionamento si esegue su di essi la prova di trazione indiretta precedentemente descritta ottenendo così l'*ITS dry* nel caso asciutto e l'*ITS wet* nel caso bagnato che permetteranno di calcolare *ITS ratio* cioè il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta del provino condizionato in acqua e quella del provino condizionato in aria, con la seguente formula:

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

Tale procedura è stata eseguita su tutte e tre le miscele con lo scopo di comparare le prestazioni delle stesse in condizioni asciutte e bagnate.

4.3 Miscele di progetto degli aggregati

La curva granulometrica di progetto, relativa alle tre miscele realizzate con diversa tipologia di emulsione bituminosa, è stata determinata in modo tale che essa sia contenuta, quanto più possibile, nel fuso del Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano illustrato nel paragrafo 2.7.

Quindi dal punto di vista granulometrico è stata utilizzata un'unica miscela che è composta da:

- *RAP fino* in quantità pari al 60,0% in peso della miscela;
- *RAP grosso* in quantità pari al 19,6% in peso della miscela;

- RAP 16-20 in quantità pari al 14,2% in peso della miscela;

Questi aggregati sono stati poi corretti granulometricamente con:

- Filler di recupero in quantità pari a 6,1% in peso della miscela.

In questo modo è stato possibile ottenere una curva che rientrasse nel fuso di Bolzano come è possibile notare nella *Figura 4.55*.

	fino	grosso	16-20	Filler calcareo	MIX di progetto
Apertura setacci [mm]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]	Passante cumulativo [%]
31,5	100,0	100,0	100,0	100	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100	100,0
16	100,0	90,9	0,0	100	84,0
10	96,7	68,5	0,0	100	77,7
8	85,6	56,9	0,0	100	68,7
4	52,7	33,7	0,0	100	41,6
2	28,0	16,9	0,0	100	29,2
1	11,9	7,2	0,0	100	20,5
0,5	3,7	3,1	0,0	100	15,1
0,25	2,0	2,2	0,0	99,1	12,2
0,125	0,5	1,1	0,0	92,4	9,2
0,063	0,3	0,6	0,0	79,3	7,1
Fondo	0	0	0	0	0

Tabella 4.11 - Granulometrie relative alle componenti della miscela di progetto

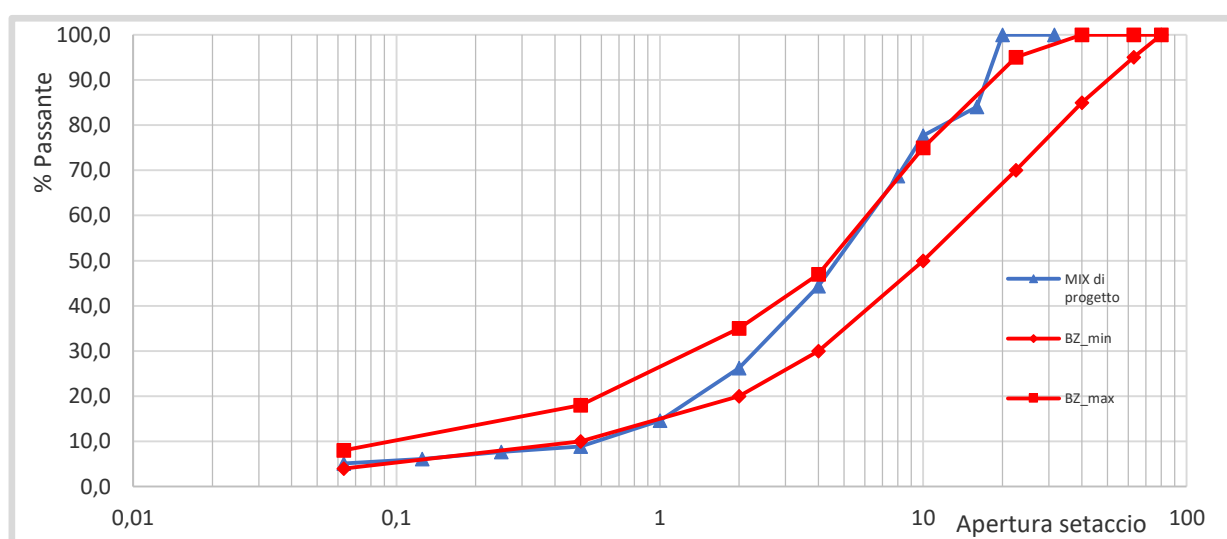


Figura 4.55 - Curva granulometrica miscela di progetto

4.4 Miscele di progetto

Ciò che differenzia le tre miscele di progetto, come precedentemente accennato, è la tipologia di emulsione bituminosa (normale, modificata con polimeri e modificata con Lattice), perciò si è mantenuto costante il suo dosaggio insieme a quello di tutti gli altri componenti. Quest'ultimi si andranno ad aggiungere agli aggregati appena visti e risultano essere:

- emulsione bituminosa pari al 4% in peso della miscela;
- cemento Portland pari al 2% in peso della miscela;
- acqua pari al 5% in peso della miscela.

L'obiettivo della sperimentazione è stato quello di caratterizzare e confrontare a livello prestazionale le miscele di conglomerato bituminoso riciclato a freddo al variare della tipologia di emulsione utilizzata.

4.4.1 Codifica provini

Per ciascuna delle tre miscele sono stati realizzati più impasti, più precisamente quattro, che sono stati identificati in ordine di confezionamento con le lettere dell'alfabeto in ordine crescente dalla lettera A.

Inoltre, in base alla famiglia di appartenenza di ciascun impasto, si è utilizzata una codifica coerente con la tipologia di emulsione impiegata, in particolar modo con la lettera N per l'emulsione normale, con la lettera P per la miscela realizzata con emulsione bituminosa modificata con polimeri e con la lettera L per quella confezionata con emulsione bituminosa modificata con lattice.

I singoli provini sono stati quindi identificati secondo lo schema in esempio sotto riportato.

Provino: AN_1

con:

- la lettera A che rappresenta il primo dei quattro impasti;
- la lettera N che corrisponde alla miscela realizzata con emulsione bituminosa normale;
- il numero 1 che sta ad indicare il provino.

Ogni impasto ha determinato il confezionamento, tramite pressa a taglio girevole, di sei provini con diametro di 150 mm e altezza post-compattazione compresa tra 71-74 mm (*Figura 4.56*) per un totale di 24 provini per ciascuna famiglia.



Figura 4.56 - Provini

Capitolo 5 - Analisi dei risultati

All'interno di questo capitolo vengono descritti i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui provini delle tre famiglie di conglomerato bituminoso 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 4.2.2). Dai dati ottenuti è stato possibile arrivare, mediante uno specifico studio preliminare, alla miscela di aggregati ottimale e conforme al fuso del Capitolato Speciale d'Appalto adottata poi per il confezionamento di provini per le tre diverse famiglie di emulsione bituminosa.

I provini, una volta realizzati mediante l'utilizzo della pressa a taglio giratoria, sono stati posizionati in stufa a 40°C per trenta giorni per accelerare la loro maturazione.

I test eseguiti sui vari provini sono riportati di seguito, suddivisi per le tre famiglie di emulsione bituminosa e secondo il seguente ordine:

- Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità;
- Perdita di acqua;
- Prove di Modulo di Rigidezza a Trazione Indiretta (ITSM);
- Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS);
- Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITSr.

5.1 Emulsione Normale

Di seguito vengono riportati i nomi che sono stati associati ai provini in relazione alle prove ad essi assegnate:

- Le curve di compattazione, i parametri di lavorabilità e la perdita di acqua sono stati ricavati per tutti i provini ad eccezione dei 6 realizzati per la prova di sensibilità all'acqua, quindi:
AN_1; AN_2; AN_3; AN_4; AN_5; AN_6; BN_7; BN_8; BN_9; BN_10; BN_11; BN_12;
CN_13; CN_14; CN_15; CN_16; CN_17; CN_18; DN_19; DN_20; DN_21; DN_22; DN_23;
DN_24.
- Il modulo di rigidezza a trazione indiretta è stato ricavato sui seguenti provini:
AN_1; AN_3; AN_5; BN_7; BN_9; BN_11; CN_13; CN_15; CN_17; DN_19; DN_21;
DN_23.
- Le prove di rottura a trazione indiretta sono state eseguite sui seguenti provini:
AN_2; AN_4; AN_6; BN_8; BN_10; BN_12; CN_14; CN_16; CN_18; DN_20; DN_22;
DN_24.
- La Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITSr è stata eseguita sfruttando i seguenti provini:
EN_7; EN_8; EN_9; EN_10; EN_11; EN_12.

5.1.1 Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità

Durante la compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria si sono ricavate le curve di compattazione; inoltre sono stati eseguiti i calcoli dei parametri di lavorabilità, precedentemente descritti al paragrafo 4.2.4.

I risultati ottenuti sui vari provini per ciascun impasto sono di seguito riportate:

5.1.1.1 Impasto AN

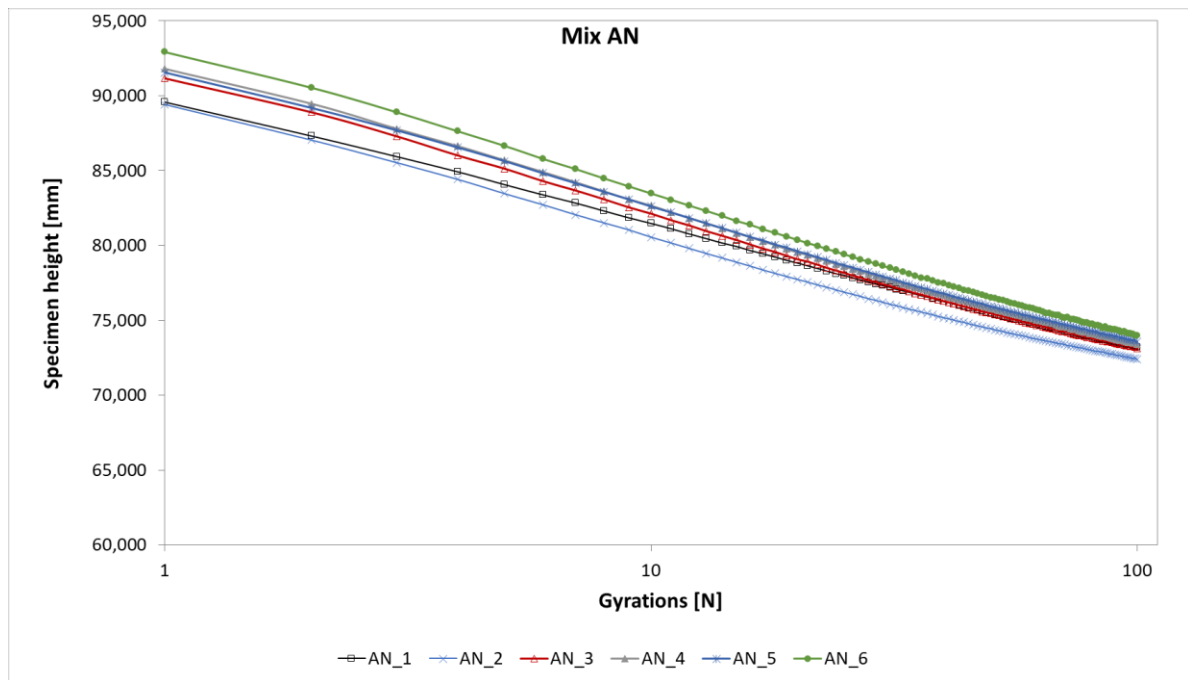


Figura 5.1 - Curve di compattazione provini dell'impasto AN

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
1	60,65	3,2122
2	61,113	3,3342
3	59,497	3,498
4	58,989	3,5417
5	59,181	3,4609
6	58,194	3,5766
media	59,604	3,437

Tabella 5.1 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto AN

5.1.1.2 Impasto BN

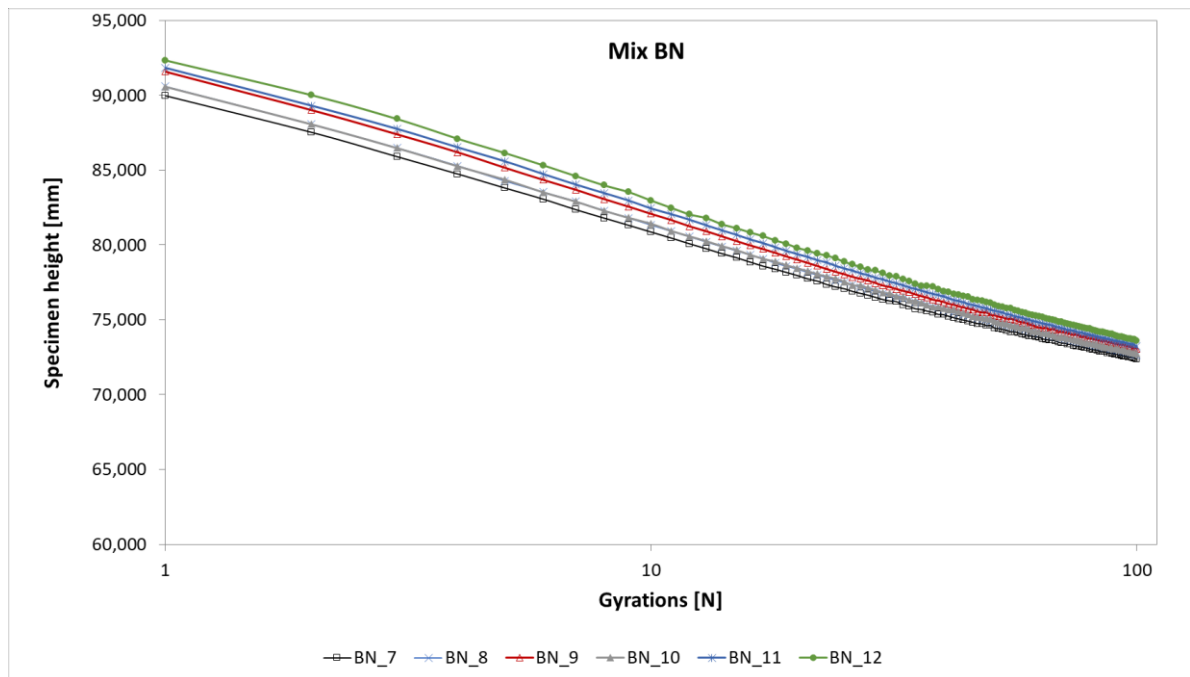


Figura 5.2 - Curve di compattazione provini dell'impasto BN

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
7	60,666	3,4255
8	60,187	3,4605
9	59,413	3,5414
10	60,204	3,44
11	59,048	3,5627
12	58,624	3,574
media	59,690	3,501

Tabella 5.2 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto BN

5.1.1.3 Impasto CN

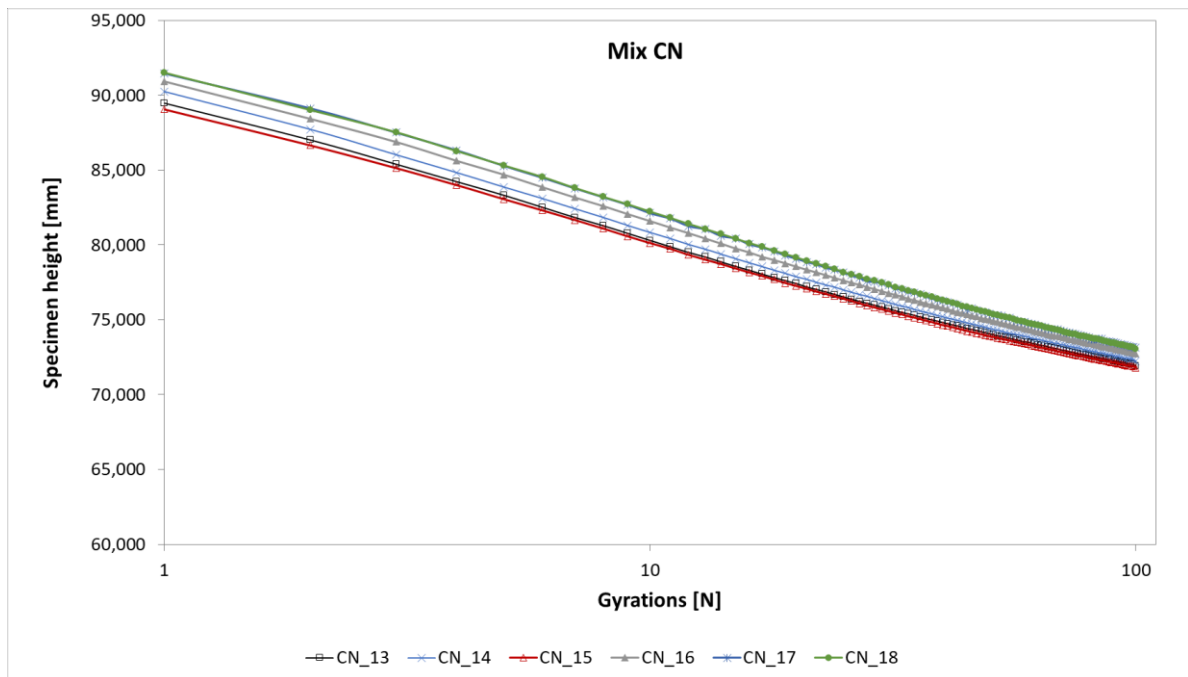


Figura 5.3 - Curve di compattazione provini dell'impasto CN

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
13	61,085	3,4403
14	60,527	3,486
15	61,29	3,4244
16	59,858	3,5206
17	59,345	3,5418
18	59,258	3,56
media	60,227	3,496

Tabella 5.3 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto CN

5.1.1.4 Impasto DN

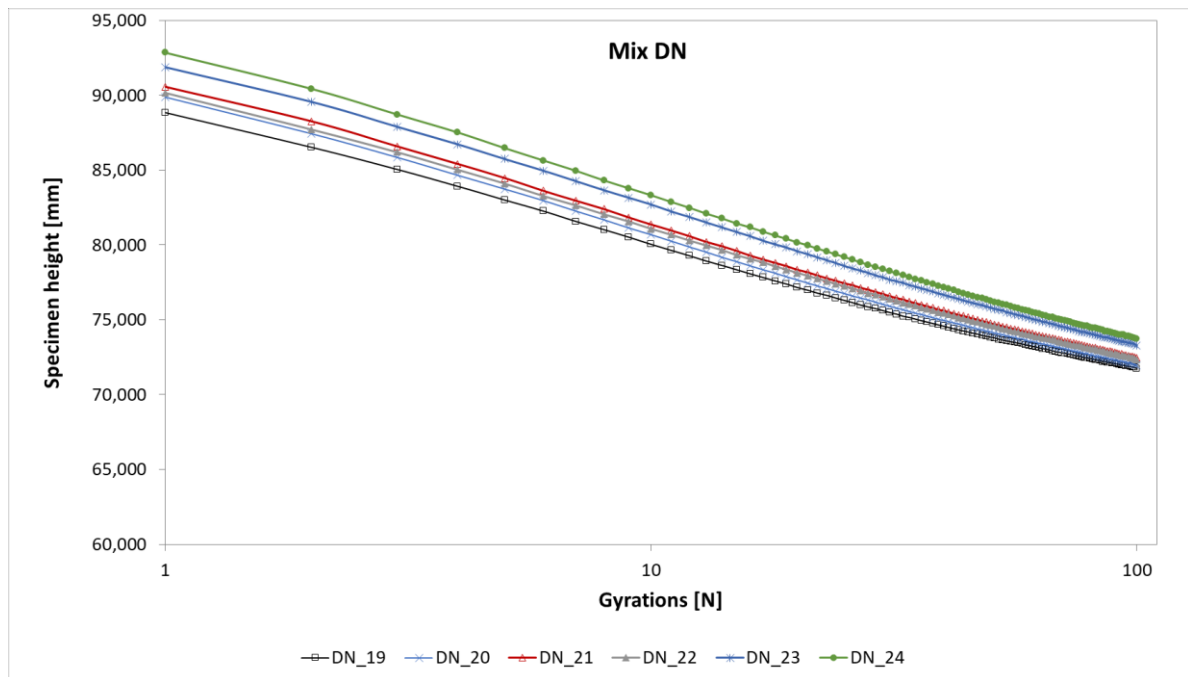


Figura 5.4 - Curve di compattazione provini dell'impasto DN

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
19	61,385	3,4187
20	60,604	3,5323
21	59,969	3,5475
22	60,347	3,487
23	58,851	3,5845
24	58,228	3,628
media	59,897	3,533

Tabella 5.4 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto DN

5.1.2 Calcolo dei vuoti

I vuoti sono stati calcolati tramite la determinazione del loro volume utilizzando la seguente formula:

$$V_{m,geom} = \frac{\rho_{max} - \rho_{geom}}{\rho_{max}} \times 100$$

con:

- ρ_{max} : massima densità che il provino può avere andando ad eliminare totalmente i vuoti, come se esso fosse completamente compattato;
- ρ_{geom} : densità che effettivamente si ha nella situazione reale.

I risultati ottenuti sono riportati nella *Tabella 5.5*:

VUOTI	NORMALE		
	Vuoti no water (teorici)		
Codice	m (no water) [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
AN_2	2709,3	2,1031	13,3
AN_4	2717	2,0763	14,4
AN_6	2723,1	2,0622	15
BN_8	2714,5	2,0956	13,6
BN_10	2718,1	2,1049	13,2
BN_12	2723,3	2,0812	14,2
CN_14	2714,9	2,114	12,9
CN_16	2720,5	2,0996	13,5
CN_18	2721,2	2,0916	13,8
DN_20	2709,2	2,1168	12,7
DN_22	2716,6	2,1124	12,9
DN_24	2728,9	2,0875	13,9
	media		13,7

Tabella 5.5 – Calcolo dei vuoti emulsione normale

Dove m (*no water*) è la massa impiegata per il calcolo del volume dei vuoti e determinata considerando il peso del provino a rottura a cui viene sottratto il contenuto di acqua persa fino a quel momento.

5.1.3 Perdita di acqua

Nel grafico seguente vengono riportati i valori relativi alla perdita di umidità dei provini dei vari impasti realizzati mediante l'impiego dell'emulsione normale (N).

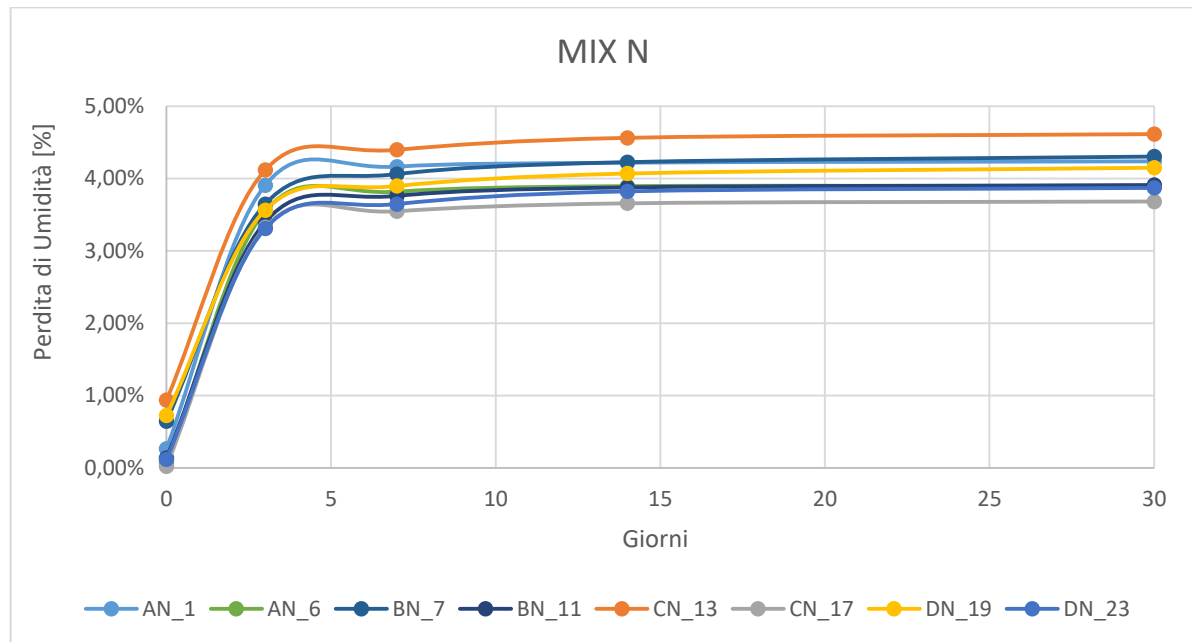


Figura 5.5 - Perdita di acqua nel tempo di alcuni provini della miscela N

5.1.4 Prove di Modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM)

Come già descritto nel precedente capitolo, questa prova è condotta su due diagonali del provino ortogonali l'uno rispetto all'altro ed il valore preso in considerazione non sarà altro che il loro valore medio indicato con $ITSM_m$.

Codice	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AN_1	4182	3983	4083	4430	4309	4370	4606	4462	4534	4757	4700	4729
AN_3	4340	4358	4349	4858	4758	4808	4964	4994	4979	5163	5214	5189
AN_5	3931	4084	4008	4533	4566	4550	4988	5019	5004	4969	5121	5045
BN_7	4134	4082	4108	4772	4608	4690	5454	5175	5315	5749	5555	5652
BN_9	3949	3872	3911	4419	4227	4323	4768	4656	4712	4960	4927	4944
BN_11	3838	3765	3802	4490	4403	4447	4917	4869	4893	4943	5044	4994
CN_13	3568	3733	3651	4269	4255	4262	4661	4572	4617	5189	5255	5222
CN_15	4379	4342	4361	5019	4888	4954	5351	5544	5448	6196	6265	6231
CN_17	3644	3517	3581	4306	4016	4161	4240	4337	4289	4855	4662	4759
DN_19	4040	3866	3953	4756	4653	4705	5305	4949	5127	5532	5331	5432
DN_21	4207	4014	4111	4882	4743	4813	4902	4732	4817	5505	5471	5488
DN_23	3669	3567	3618	4400	4487	4444	4701	4992	4847	4932	4969	4951
		media	3961		media	4544		media	4882		media	5219

Tabella 5.6 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia N

Possiamo notare dalla *Tabella 5.6* come il valore dei moduli cresca nel tempo e come tale incremento sia soprattutto più importante dai 3 ai 7 giorni. Questo è legato all'aumento della rigidità dovuta alla maturazione del cemento all'interno della miscela. Una maggiore perdita di acqua nel primo periodo della maturazione (*Figura 5.5*) è sintomo di una maggiore velocità di maturazione. Questa situazione è ancora più evidente nel seguente grafico (*Figura 5.6*):

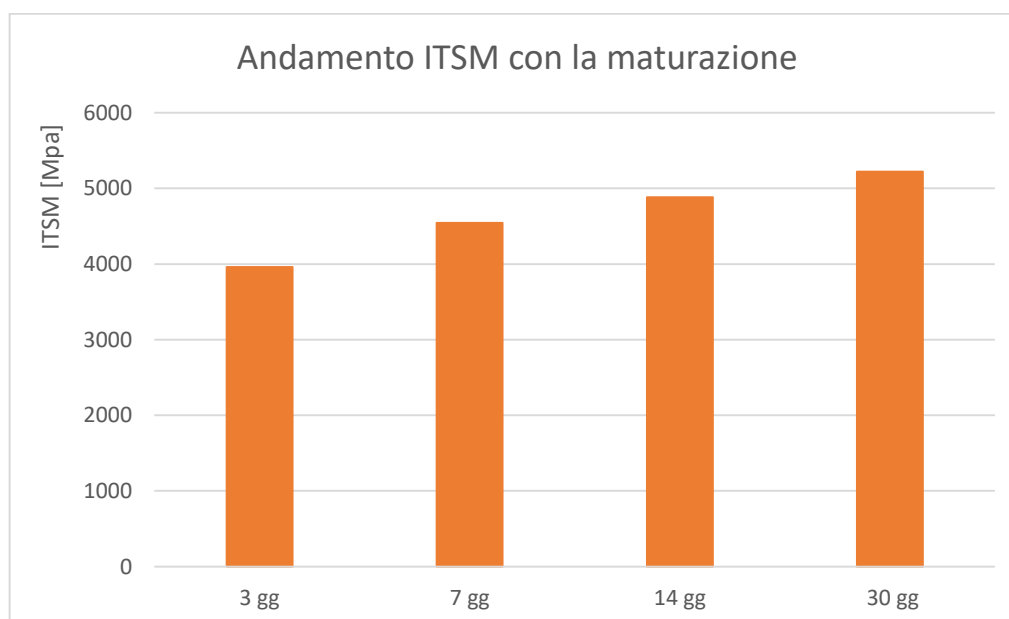


Figura 5.6 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia N

5.1.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

Codice	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
AN_2	2,2639	7,657	0,446	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AN_4	-	-	-	-	-	-	1,9765	6,973	0,399	-	-	-
AN_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,9069	8,395	0,477
BN_8	-	-	-	2,3072	9,064	0,525	-	-	-	-	-	-
BN_10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0613	8,399	0,519
BN_12	2,2478	6,772	0,388	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CN_14	-	-	-	-	-	-	2,6093	8,900	0,52	-	-	-
CN_16	2,2248	7,237	0,419	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CN_18	-	-	-	2,1276	7,653	0,441	-	-	-	-	-	-
DN_20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5402	9,012	0,528
DN_22	-	-	-	-	-	-	1,9714	7,970	0,465	-	-	-
DN_24	-	-	-	2,2274	8,322	0,477	-	-	-	-	-	-
		media	0,418		media	0,481		media	0,461		media	0,508

Tabella 5.7 - Valori ITS nel tempo per la famiglia N

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico (Figura 5.7):

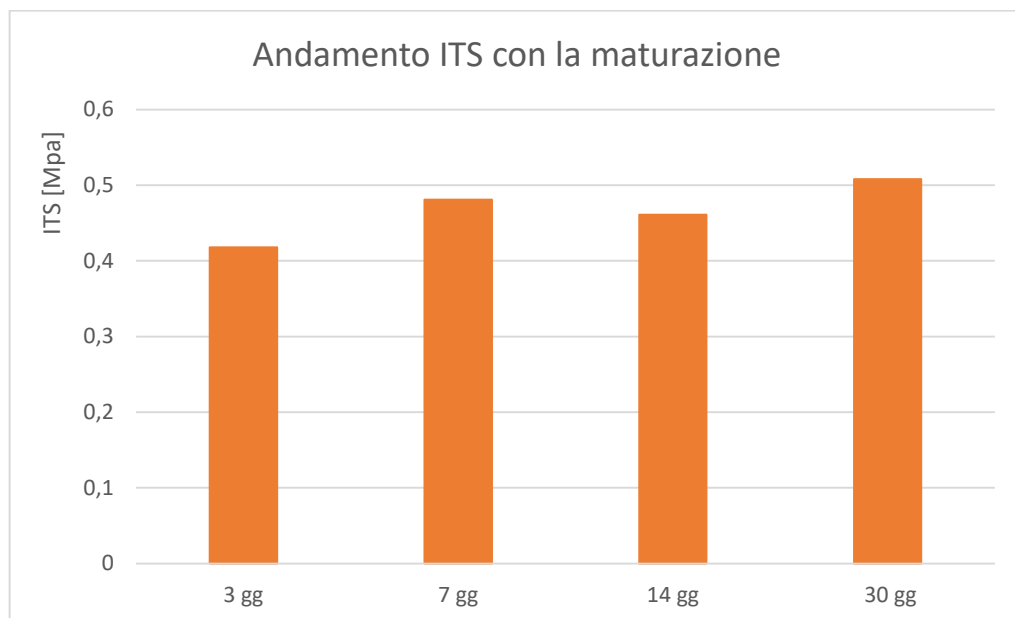


Figura 5.7 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia N

5.1.6 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS

Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
EN_7	0,015514	10,610	0,632	-	-	-	0,91
EN_8	-	-	-	0,018408	10,20201	0,607	
EN_9	0,016911	10,764	0,638	-	-	-	
EN_10	-	-	-	0,016268	8,71	0,514	
EN_11	0,016933	8,18541	0,479	-	-	-	
EN_12	-	-	-	0,016911	8,14	0,472	
			0,583			0,531	

Tabella 5.8 - Risultati rotture ITS per calcolo della Sensibilità all'Acqua, per la famiglia N

Come è riportato nella *Tabella 5.8*, è stato inoltre calcolato il valore ITS ratio (paragrafo 4.2.7.1), calcolato come:

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

I risultati sono stati anche graficati:

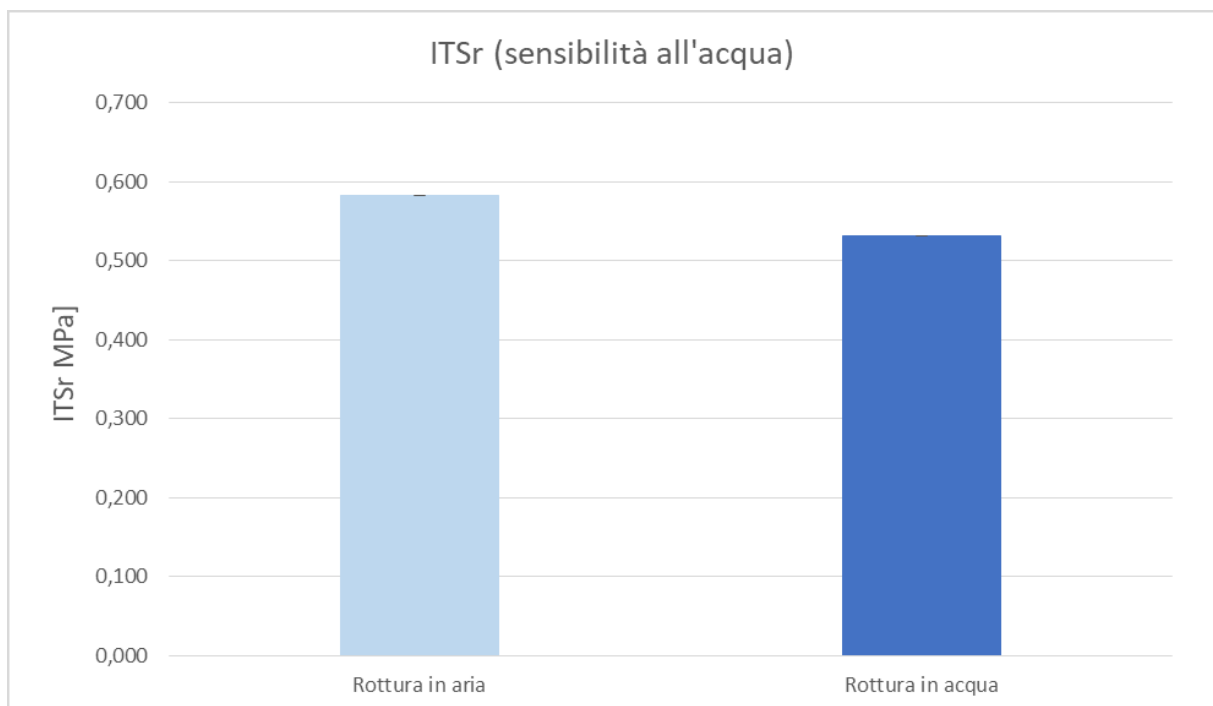


Figura 5.8 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia N

5.2 **Emulsione Modificata con Polimeri**

Di seguito vengono riportati i nomi che sono stati associati ai provini in relazione alle prove ad essi assegnate:

- Le curve di compattazione, i parametri di lavorabilità e la perdita di acqua sono stati ricavati per tutti i provini ad eccezione dei 6 realizzati per la prova di sensibilità all'acqua, quindi:
AP_1; AP_2; AP_3; AP_4; AP_5; AP_6; BP_7; BP_8; BP_9; BP_10; BP_11; BP_12; CP_13; CP_14; CP_15; CP_16; CP_17; CP_18; DP_19; DP_20; DP_21; DP_22; DP_23; DP_24.
- Il modulo di rigidità a trazione indiretta è stato ricavato sui seguenti provini:
AP_1; AP_3; AP_5; BP_7; BP_9; BP_11; CP_13; CP_15; CP_17; DP_19; DP_21; DP_23.
- Le prove di rottura a trazione indiretta sono state eseguite sui seguenti provini:
AP_2; AP_4; AP_6; BP_8; BP_10; BP_12; CP_14; CP_16; CP_18; DP_20; DP_22; DP_24.
- La Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS è stata eseguita sfruttando i seguenti provini:
EP_13; EP_14; EP_15; EP_16; EP_17; EP_18.

5.2.1 **Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità**

Durante la compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria si sono ricavate le curve di compattazione; inoltre sono stati eseguiti i calcoli dei parametri di lavorabilità, precedentemente descritti al paragrafo 4.2.4.

I risultati ottenuti sui vari provini per ciascun impasto sono di seguito riportate:

5.2.1.1 Impasto AP

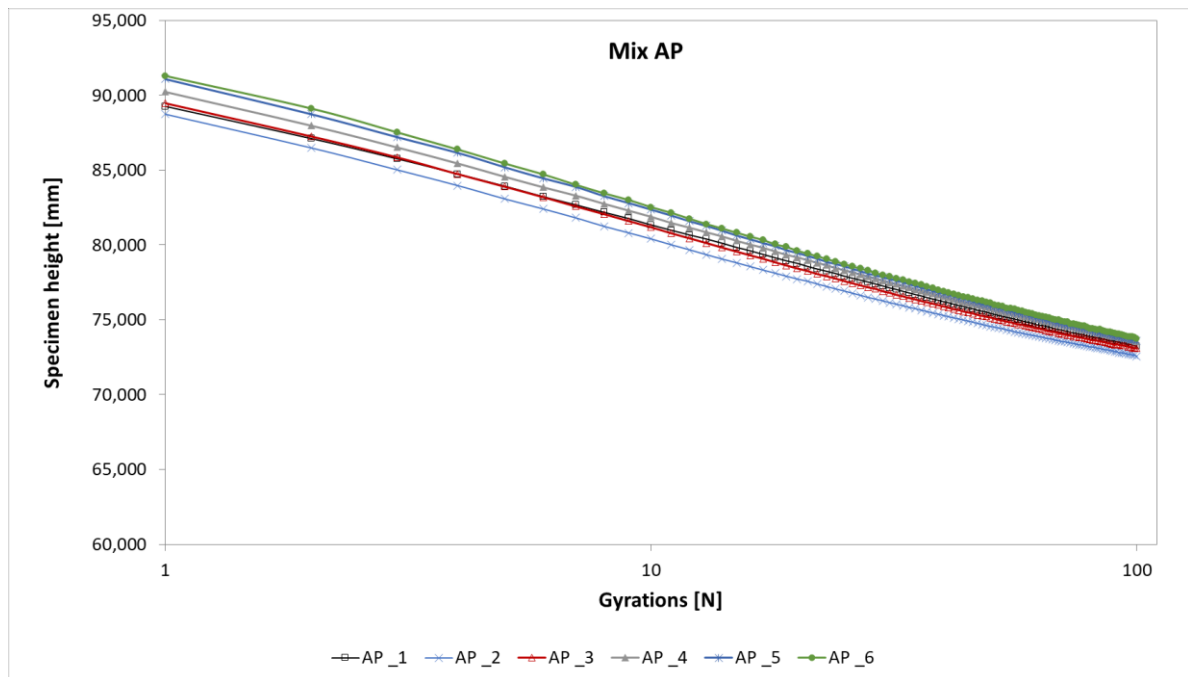


Figura 5.9 - Curve di compattazione provini dell'impasto AP

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
1	60,837	3,1712
2	61,615	3,1756
3	60,89	3,2205
4	60,291	3,2193
5	59,587	3,3674
6	59,422	3,3688
media	60,440	3,254

Tabella 5.9 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto AP

5.2.1.2 Impasto BP

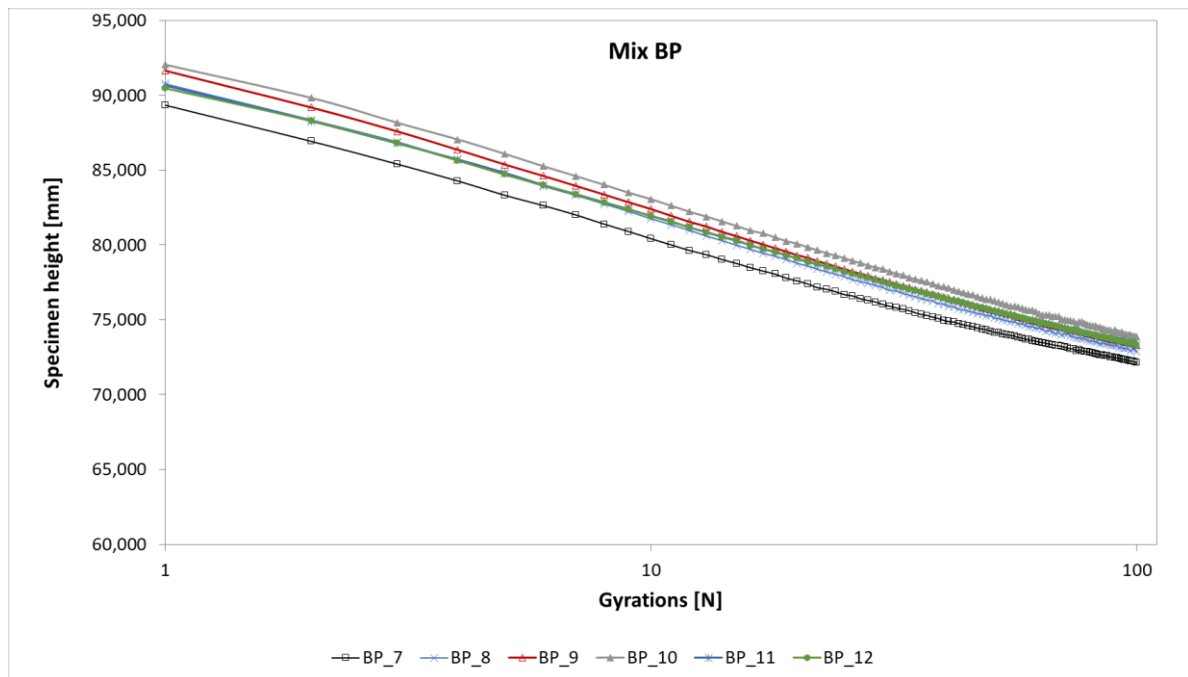


Figura 5.10 - Curve di compattazione provini dell'impasto BP

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
7	61,115	3,3842
8	59,83	3,4757
9	59,263	3,5036
10	58,773	3,4783
11	59,949	3,3498
12	59,991	3,3353
media	59,82	3,421

Tabella 5.10 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto BP

5.2.1.3 Impasto CP

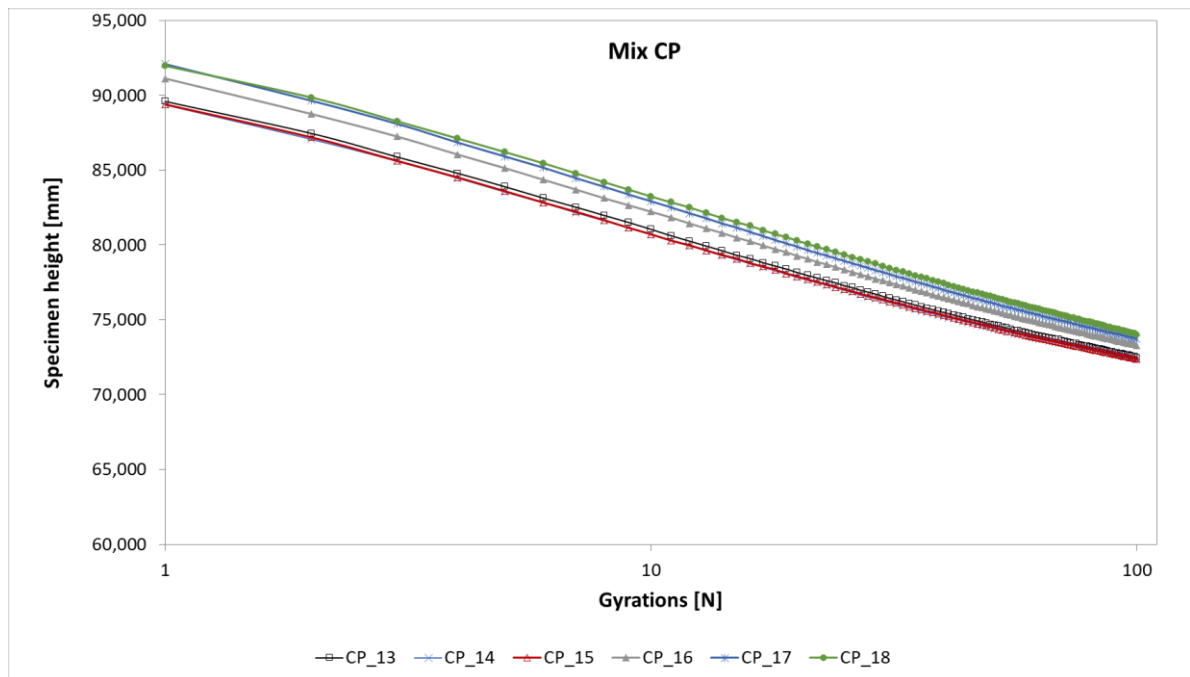


Figura 5.11 - Curve di compattazione provini dell'impasto CP

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
13	60,602	3,4051
14	60,976	3,3587
15	60,915	3,3673
16	59,518	3,4498
17	58,845	3,498
18	58,69	3,4469
media	59,924	3,421

Tabella 5.11 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto CP

5.2.1.4 Impasto DP

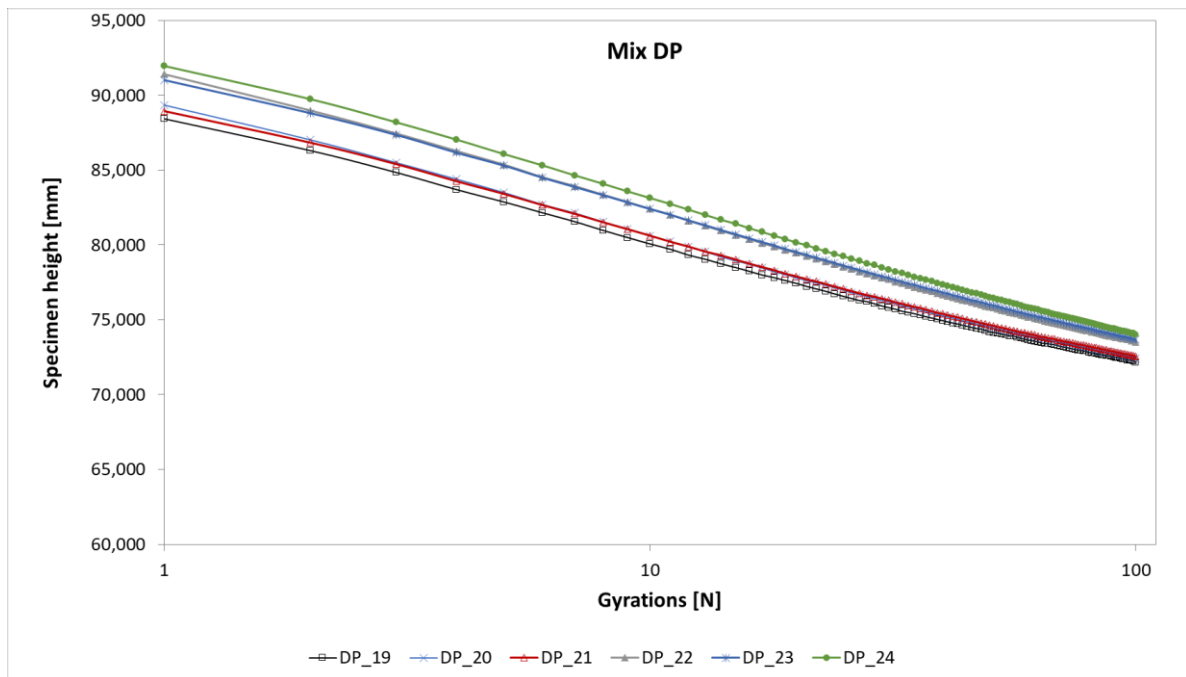


Figura 5.12 - Curve di compattazione provini dell'impasto DP

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
19	61,734	3,2348
20	61,107	3,316
21	61,255	3,2505
22	59,417	3,4236
23	59,59	3,3449
24	58,82	3,4268
media	60,321	3,333

Tabella 5.12 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto DP

5.2.2 Calcolo dei vuoti

I vuoti sono stati calcolati nelle stesse modalità descritte nel Paragrafo 5.1.2 relativo all'utilizzo dell'emulsione normale ed i risultati in questo caso ottenuti sono i seguenti (Tabella 5.13):

VUOTI	POLIMERI		
	Vuoti no water (teorici)		
Codice	m (no water) [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
AP_2	2710,1	2,1045	13,2
AP_4	2718,8	2,0869	14
AP_6	2716,4	2,0821	14,2
BP_8	2713,7	2,095	13,6
BP_10	2724,2	2,0861	14
BP_12	2717,2	2,0842	14,1
CP_14	2709,3	2,114	12,9
CP_16	2715,3	2,0898	13,9
CP_18	2721,5	2,0679	14,8
DP_20	2710,3	2,1118	12,9
DP_22	2721,4	2,091	13,8
DP_24	2716,5	2,0745	14,5
	media		13,8

Tabella 5.13 - Calcolo dei vuoti emulsione modificata con polimeri

5.2.3 Perdita di acqua

Nel grafico seguente (Figura 5.13) vengono riportati i valori relativi alla perdita di umidità dei provini dei vari impasti realizzati mediante l'impiego dell'emulsione modificata con polimeri (P).

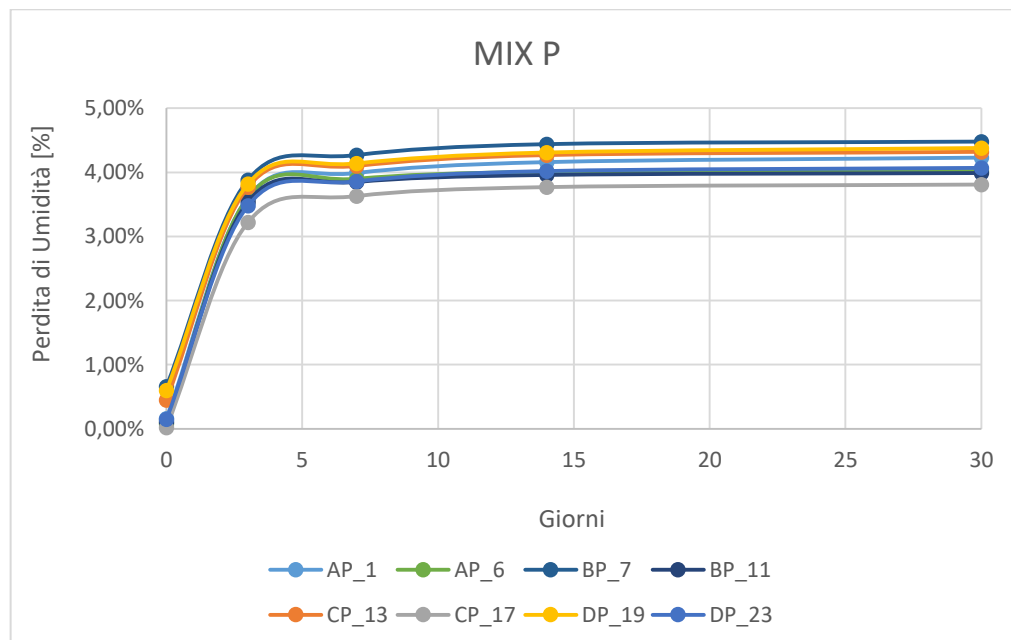


Figura 5.13 - Perdita di acqua nel tempo di alcuni provini della miscela P

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

Come già descritto nel precedente capitolo, questa prova è condotta su due diagonali del provino ortogonali l'uno rispetto all'altro ed il valore preso in considerazione non sarà altro che il loro valore medio indicato con $ITSM_m$.

Codice	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]	ITSM ₁ [MPa]	ITSM ₂ [MPa]	ITSM _m [MPa]
AP_1	3732	3582	3657	4717	4598	4658	4850	4848	4849	5426	5439	5433
AP_3	3707	3707	3707	4487	4497	4492	4602	4645	4624	5518	5650	5584
AP_5	3622	3427	3525	4479	4381	4430	4572	4498	4535	5467	5197	5332
BP_7	3366	3232	3299	4026	4018	4022	4217	4400	4309	4873	4949	4911
BP_9	3705	3633	3669	4265	4137	4201	4618	4454	4536	4891	4798	4845
BP_11	3346	3287	3317	4276	4078	4177	4358	4332	4345	4605	4505	4555
CP_13	3496	3381	3439	4037	3901	3969	4536	4382	4459	4644	4399	4522
CP_15	3279	3325	3302	3904	3888	3896	4428	4413	4421	4962	4768	4865
CP_17	2747	2734	2741	3399	3327	3363	3773	3633	3703	3987	3843	3915
DP_19	3731	3727	3729	4534	4469	4502	5109	4840	4975	5401	5624	5513
DP_21	3694	3699	3697	4510	4363	4437	5010	5095	5053	5158	5075	5117
DP_23	3692	3447	3570	4406	4301	4354	4755	4566	4661	4618	4675	4647
		media	3471		media	4208		media	4539		media	4936

Tabella 5.14 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia P

Possiamo notare dalla *Tabella 5.14* come il valore dei moduli cresca nel tempo e come tale incremento sia soprattutto più importante dai 3 ai 7 giorni. Questo è legato all'aumento della rigidità dovuta alla maturazione del cemento all'interno della miscela. Questa situazione è ancora più evidente nel seguente grafico (*Figura 5.14*):

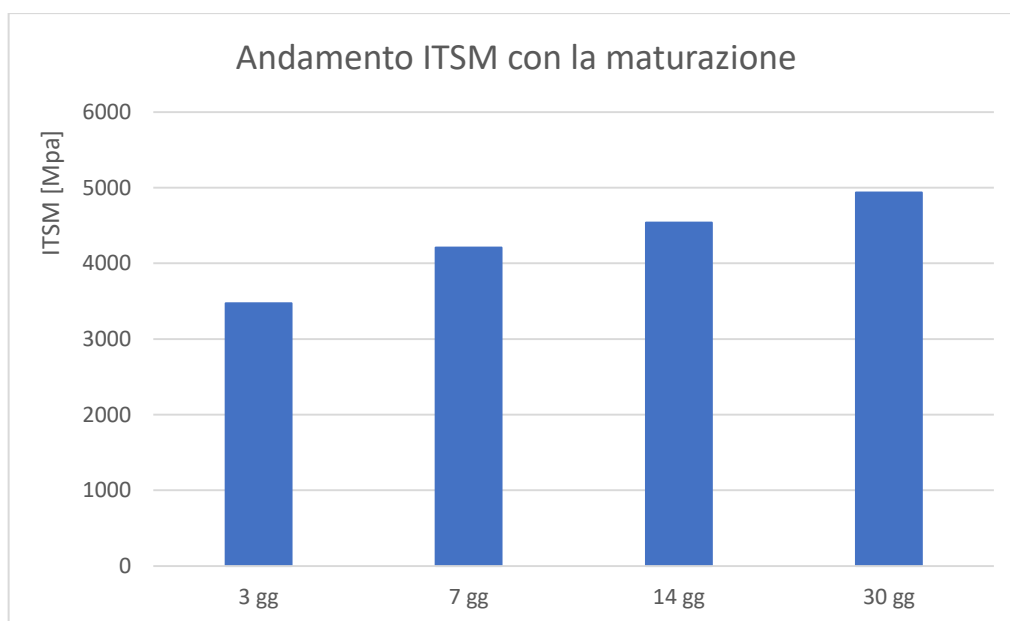


Figura 5.14 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia P

5.2.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

Codice	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
AP_2	2,2367	7,283	0,424	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AP_4	-	-	-	-	-	-	2,3332	8,909	0,513	-	-	-
AP_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3657	9,18237	0,528
BP_8	-	-	-	2,4677	7,690	0,445	-	-	-	-	-	-
BP_10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1204	7,90578	0,454
BP_12	2,1296	5,617	0,323	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP_14	-	-	-	-	-	-	2,3843	8,541	0,5	-	-	-
CP_16	2,3511	6,447	0,372	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP_18	-	-	-	2,7235	7,733	0,441	-	-	-	-	-	-
DP_20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,8281	9,94980	0,582
DP_22	-	-	-	-	-	-	2,3327	8,657	0,499	-	-	-
DP_24	-	-	-	2,2770	8,505	0,487	-	-	-	-	-	-
		media	0,373		media	0,458		media	0,504		media	0,521

Tabella 5.15 - Valori ITS nel tempo per la famiglia P

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico (Figura 5.15):

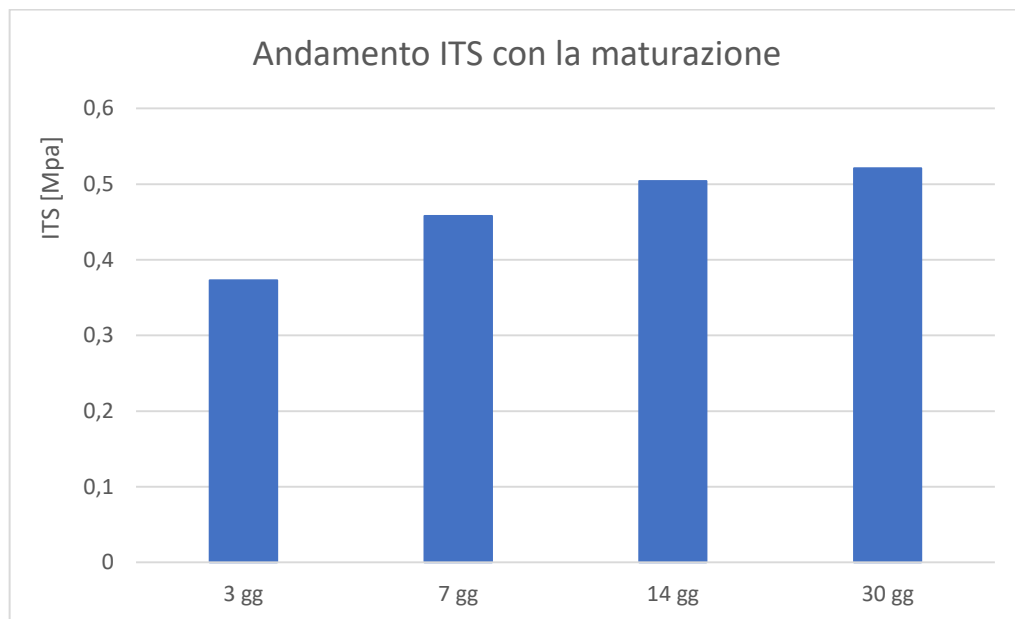


Figura 5.15 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia P

5.2.6 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS

Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
EP_13	0,022263	11,016	0,653	-	-	-	0,92
EP_14	-	-	-	0,016922	9,59574	0,566	
EP_15	0,020159	9,653	0,565	-	-	-	
EP_16	-	-	-	0,019316	9,71	0,567	
EP_17	0,023465	9,571429	0,556	-	-	-	
EP_18	-	-	-	0,018918	8,48	0,492	
			0,591			0,542	

Tabella 5.16 - Risultati rotture ITS per calcolo della Sensibilità all'Acqua, per la famiglia P

Come è riportato nella tabella precedente (5.16), è stato inoltre calcolato il valore ITS ratio (paragrafo 4.2.7.1), calcolato come:

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

I risultati sono stati anche graficati (Figura 5.16):

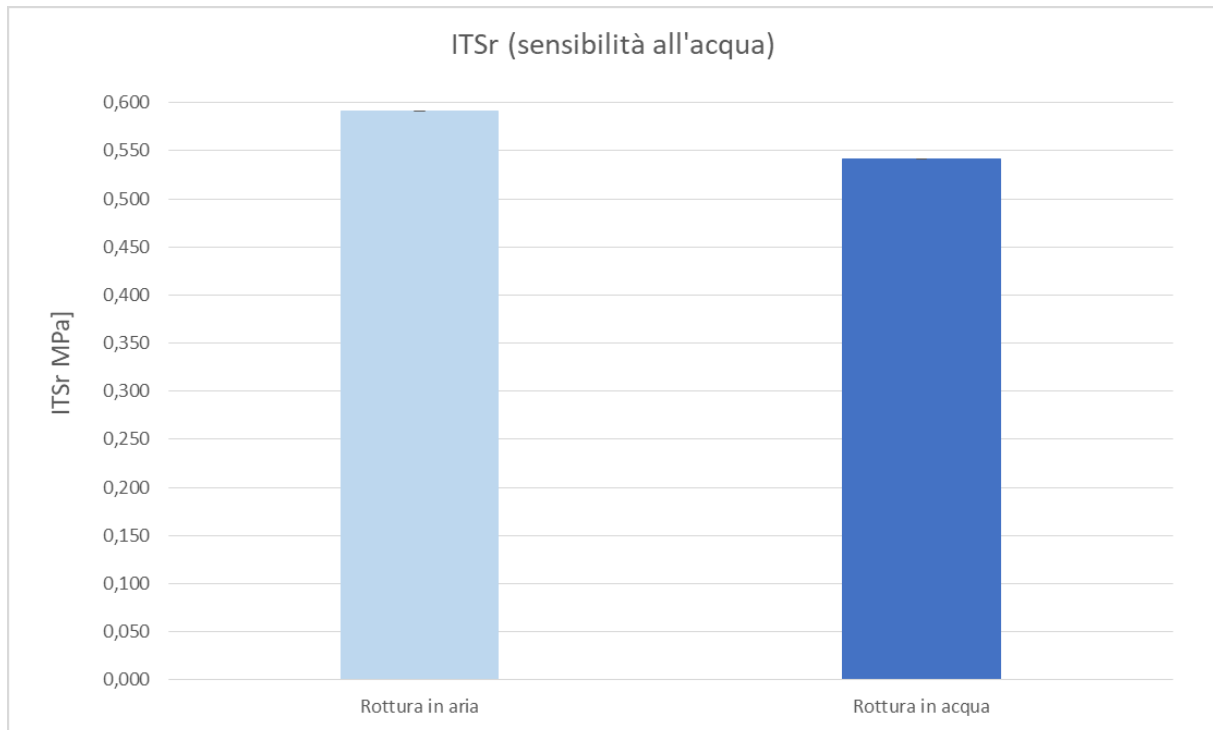


Figura 5.16 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia P

5.3 **Emulsione con Lattice**

Di seguito vengono riportati i nomi che sono stati associati ai provini in relazione alle prove ad essi assegnate:

- Le curve di compattazione, i parametri di lavorabilità e la perdita di acqua sono stati ricavati per tutti i provini ad eccezione dei 6 realizzati per la prova di sensibilità all'acqua, quindi:
AL_1; AL_2; AL_3; AL_4; AL_5; AL_6; BL_7; BL_8; BL_9; BL_10; BL_11; BL_12; CL_13;
CL_14; CL_15; CL_16; CL_17; CL_18; DL_19; DL_20; DL_21; DL_22; DL_23; DL_24.
- Il modulo di rigidità a trazione indiretta è stato ricavato sui seguenti provini:
AL_1; AL_3; AL_5; BL_7; BL_9; BL_11; CL_13; CL_15; CL_17; DL_19; DL_21; DL_23.
- Le prove di rottura a trazione indiretta sono state eseguite sui seguenti provini:
AL_2; AL_4; AL_6; BL_8; BL_10; BL_12; CP_14; CP_16; CP_18; DP_20; DP_22; DP_24.
- La Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS è stata eseguita sfruttando i seguenti provini:
EL_1; EL_2; EL_3; EL_4; EL_5; EL_6.

5.3.1 **Curve di compattazione e Parametri di lavorabilità**

Durante la compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria si sono ricavate le curve di compattazione; inoltre sono stati eseguiti i calcoli dei parametri di lavorabilità, precedentemente descritti al paragrafo 4.2.4.

I risultati ottenuti sui vari provini per ciascun impasto sono di seguito riportate:

5.3.1.1 Impasto AL

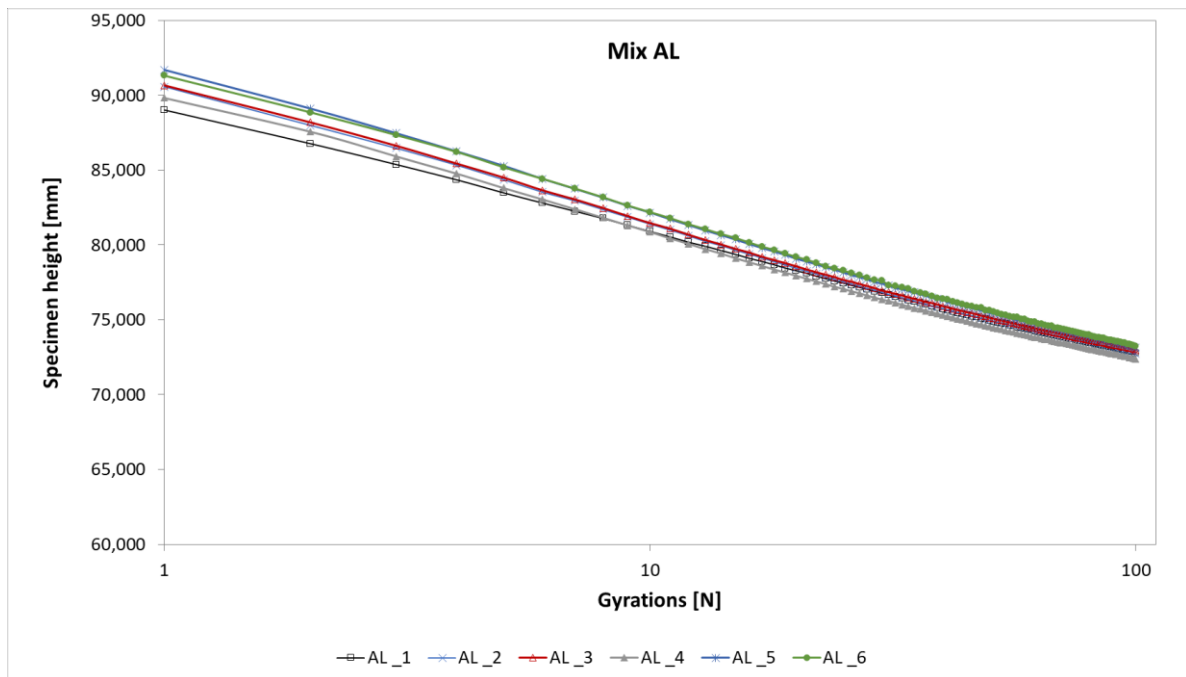


Figura 5.17 - Curve di compattazione provini dell'impasto AL

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
1	61,117	3,2132
2	60,207	3,4366
3	60,216	3,3889
4	60,691	3,4184
5	59,355	3,5312
6	59,455	3,4797
media	60,174	3,411

Tabella 5.17 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto AL

5.3.1.2 Impasto BL

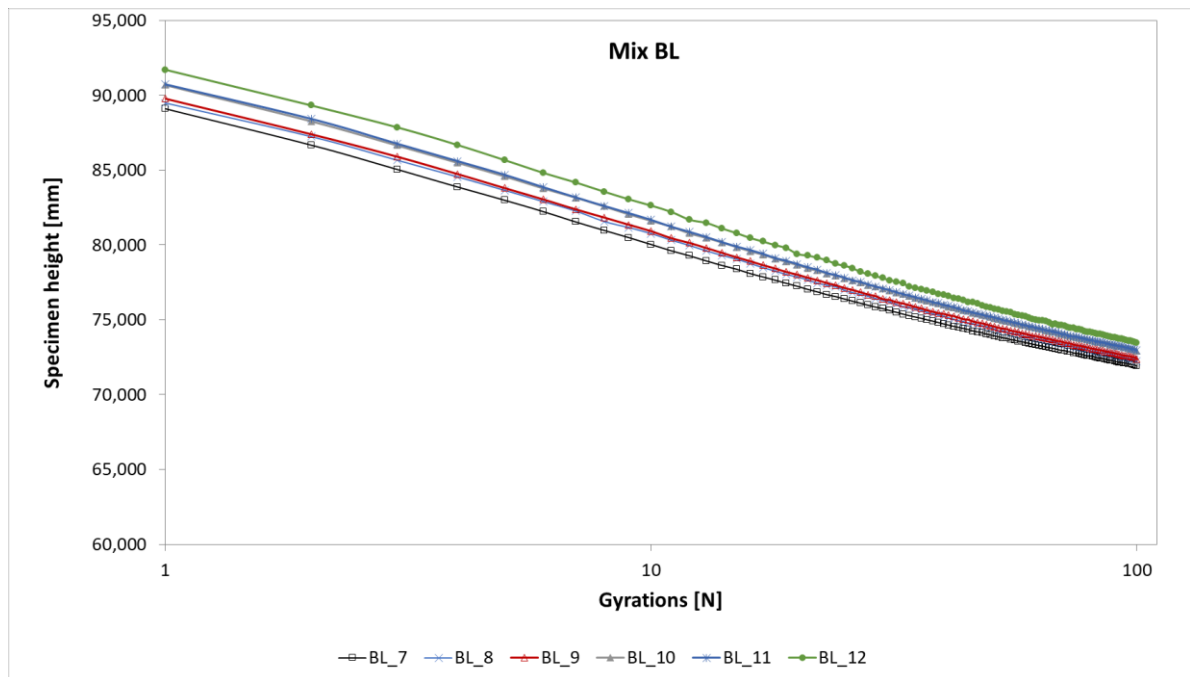


Figura 5.18 - Curve di compattazione provini dell'impasto BL

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
7	61,459	3,3639
8	60,838	3,4062
9	60,702	3,4015
10	60,059	3,4234
11	59,969	3,4398
12	59,077	3,5178
media	60,351	3,425

Tabella 5.18 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto BL

5.3.1.3 Impasto CL

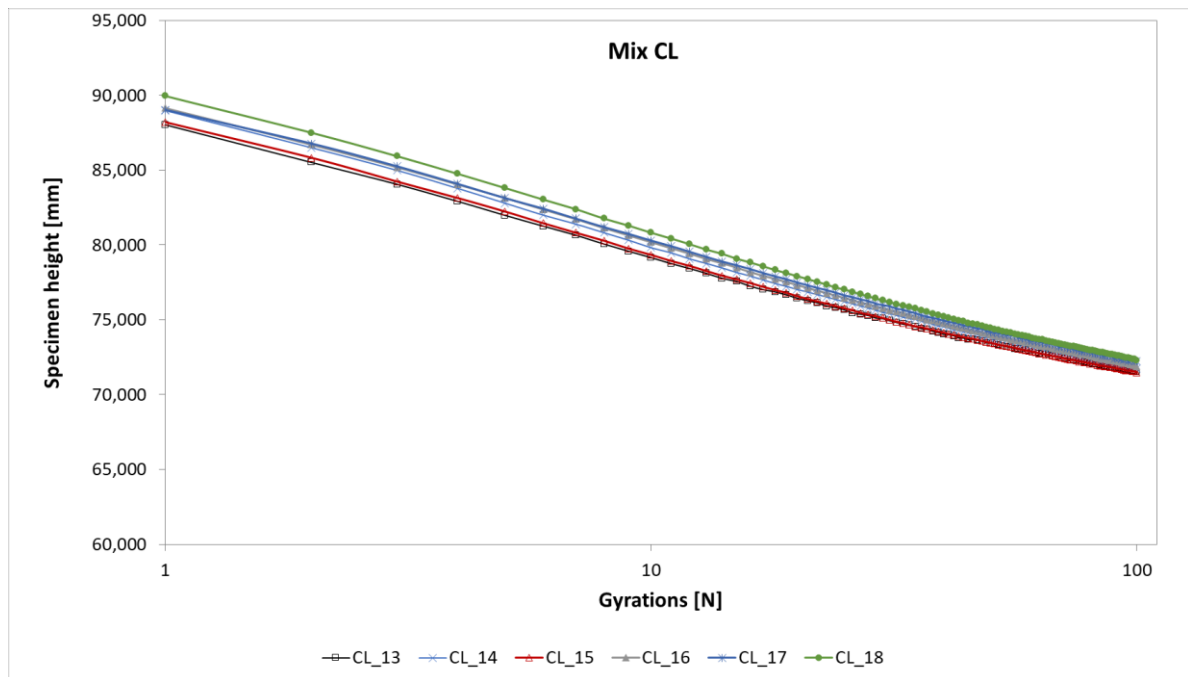


Figura 5.19 - Curve di compattazione provini dell'impasto CL

Provino	C ₁ [mm]	k [/]
13	62,472	3,2509
14	61,568	3,3841
15	62,164	3,3225
16	61,299	3,3973
17	61,352	3,3284
18	60,637	3,4519
media	61,582	3,356

Tabella 5.19 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto CL

5.3.1.4 Impasto DL

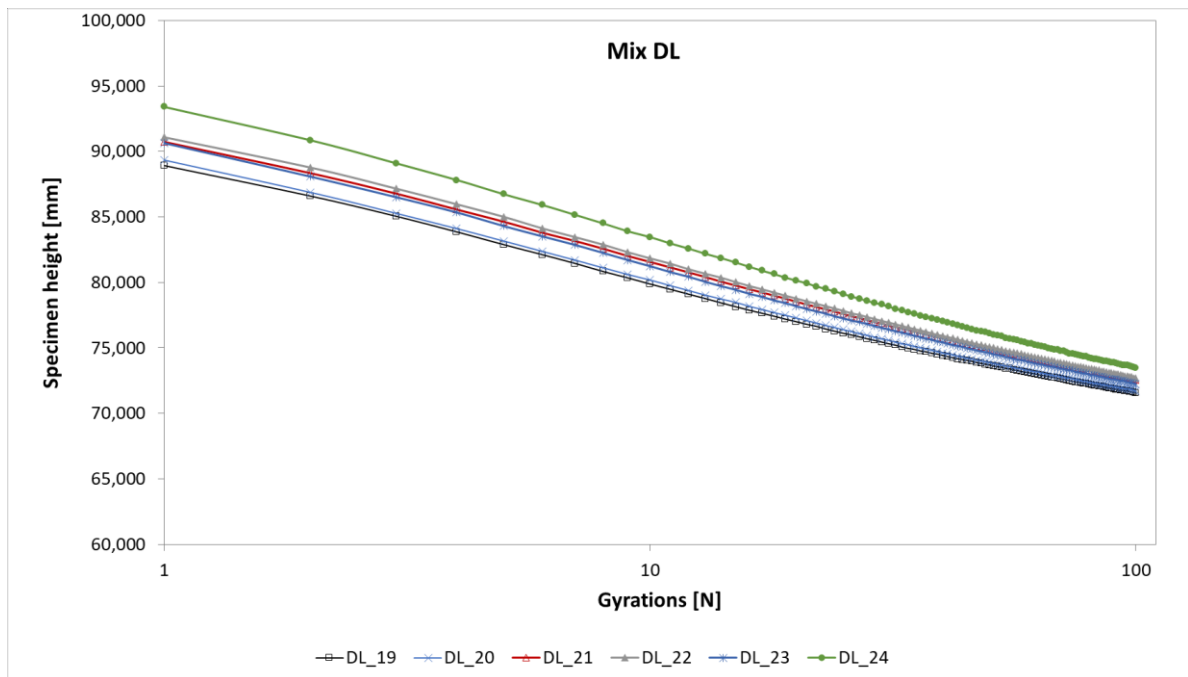


Figura 5.20 - Curve di compattazione provini dell'impasto DL

Provino	C ₁ [mm]	k [\bar{l}]
19	61,402	3,4601
20	61,1	3,4883
21	59,803	3,5616
22	59,48	3,6002
23	59,986	3,593
24	57,795	3,7814
media	59,928	3,581

Tabella 5.20 - Riepilogo parametri di lavorabilità impasto DL

5.3.2 Calcolo dei vuoti

I risultati ottenuti nel calcolo dei vuoti per la miscela realizzata con l'impiego di emulsione modificata con lattice sono di seguito riportati (Tabella 5.21):

VUOTI	LATTICE		
	Vuoti no water (teorici)		
Codice	m (no water) [g]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
AL_2	2715,4	2,0956	13,6
AL_4	2708,9	2,1071	13,1
AL_6	2715	2,0896	13,9
BL_8	2713,5	2,1172	12,7
BL_10	2718,4	2,0987	13,5
BL_12	2715,7	2,0824	14,2
CL_14	2711,9	2,1226	12,5
CL_16	2712,1	2,1169	12,7
CL_18	2713,3	2,1171	12,7
DL_20	2709,1	2,1256	12,4
DL_22	2715,9	2,1104	13
DL_24	2724	2,0965	13,6
	media		12,6

Tabella 5.21 - Calcolo dei vuoti emulsione modificata con lattice

5.3.3 Perdita di acqua

Nel grafico seguente vengono riportati i valori relativi alla perdita di umidità dei provini dei vari impasti realizzati mediante l'impiego dell'emulsione modificata con lattice (L).

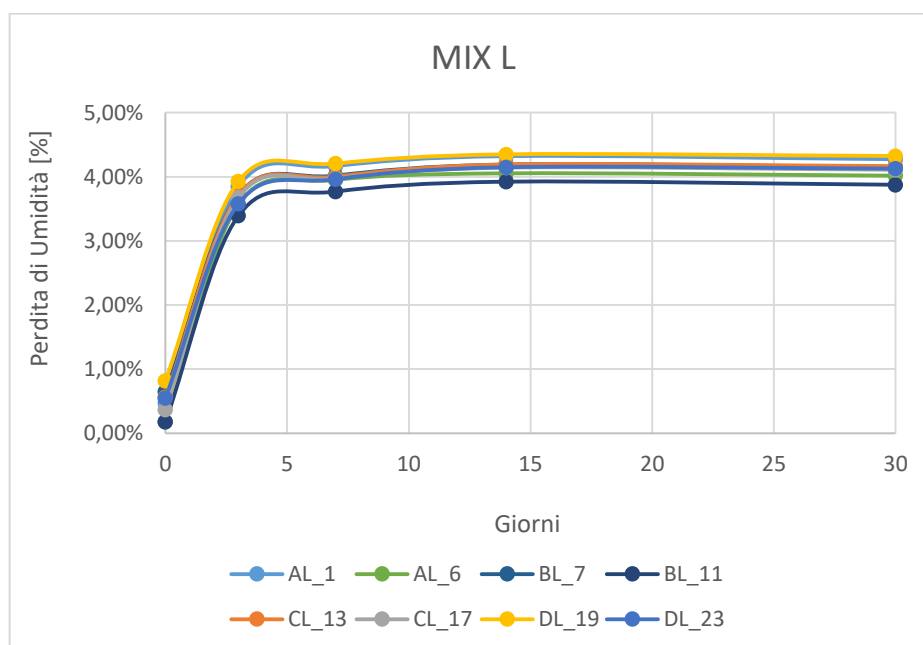


Figura 5.21 - Perdita di acqua nel tempo di alcuni provini della miscela L

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

Provini	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM ₁	ITSM ₂	ITSM _m	ITSM ₁	ITSM ₂	ITSM _m	ITSM ₁	ITSM ₂	ITSM _m	ITSM ₁	ITSM ₂	ITSM _m
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
AL_1	3284	3280	3282	3924	3740	3832	4501	4302	4402	4989	4896	4943
AL_3	3322	3400	3361	3904	3907	3906	4903	4936	4920	5227	5246	5237
AL_5	2898	2804	2851	3685	3711	3698	4571	4397	4484	4613	4545	4579
BL_7	3760	3593	3677	4282	4202	4242	5238	4941	5090	5692	5439	5566
BL_9	3180	3314	3247	4080	4060	4070	4518	4541	4530	4704	4747	4726
BL_11	3500	3428	3464	4239	4322	4281	5084	5295	5190	5279	5292	5286
CL_13	3453	3455	3454	4079	4038	4059	4756	4725	4741	5211	5211	5211
CL_15	3539	3502	3521	4390	4253	4322	4797	5080	4939	5634	5783	5709
CL_17	3506	3506	3506	4305	4311	4308	5168	5146	5157	5084	5149	5117
DL_19	3169	3039	3104	3831	3803	3817	4443	4354	4399	4694	4503	4599
DL_21	3392	3339	3366	4161	4186	4174	4706	4750	4728	5063	5273	5168
DL_23	3356	3173	3265	4118	3917	4018	4857	4761	4809	5168	4959	5064
		media	3341		media	4060		media	4782		media	5100

Tabella 5.22 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia L

Possiamo notare dalla *Tabella 5.22* che la situazione che si verifica in questa miscela è la stessa delle altre due, legata ad un incremento dei moduli più evidente dai 3 ai 7 giorni. Nel seguente grafico (*Figura 5.22*) si riportano i risultati:

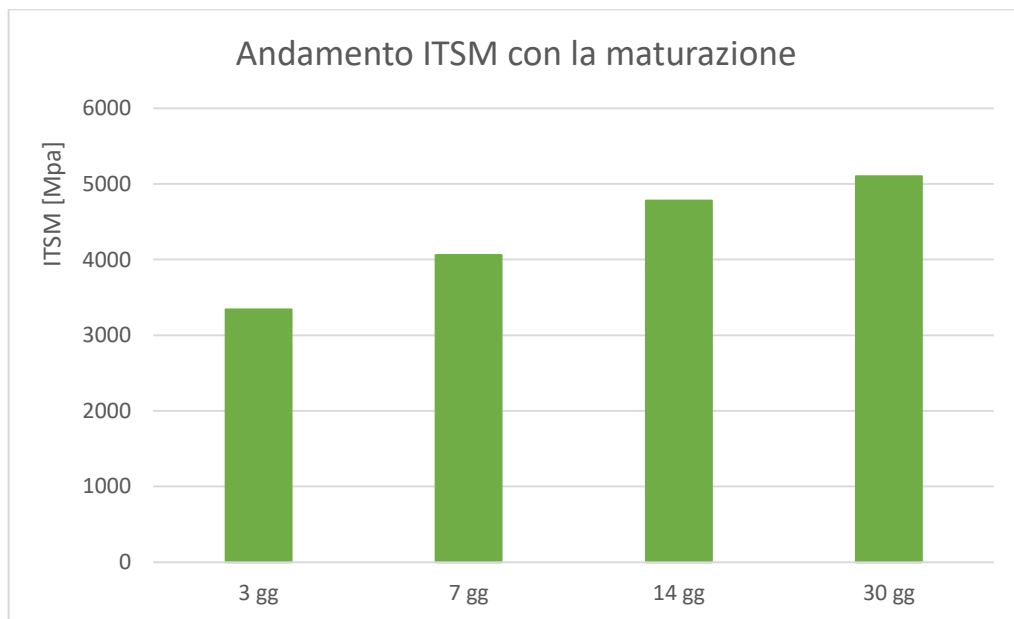


Figura 5.22 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia L

5.3.5 Prove di Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

Codice	ROTTURE											
	Rottura dopo 3 gg			Rottura dopo 7 gg			Rottura dopo 14 gg			Rottura dopo 30 gg		
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]
AL_2	2,3438	6,994	0,405	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AL_4	-	-	-	-	-	-	1,9145	8,884	0,518	-	-	-
AL_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2717	7,477	0,432
BL_8	-	-	-	2,3735	8,353	0,489	-	-	-	-	-	-
BL_10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1233	7,216	0,418
BL_12	2,0689	5,614	0,323	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CL_14	-	-	-	-	-	-	1,8350	8,571	0,503	-	-	-
CL_16	2,4659	7,018	0,411	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CL_18	-	-	-	2,1243	8,435	0,494	-	-	-	-	-	-
DL_20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2083	9,131	0,537
DL_22	-	-	-	-	-	-	1,9152	7,647	0,446	-	-	-
DL_24	-	-	-	2,1550	7,429	0,429	-	-	-	-	-	-
		media	0,380		media	0,471		media	0,489		media	0,462

Tabella 5.23 - Valori ITS nel tempo per la famiglia L

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico (Figura 5.23):

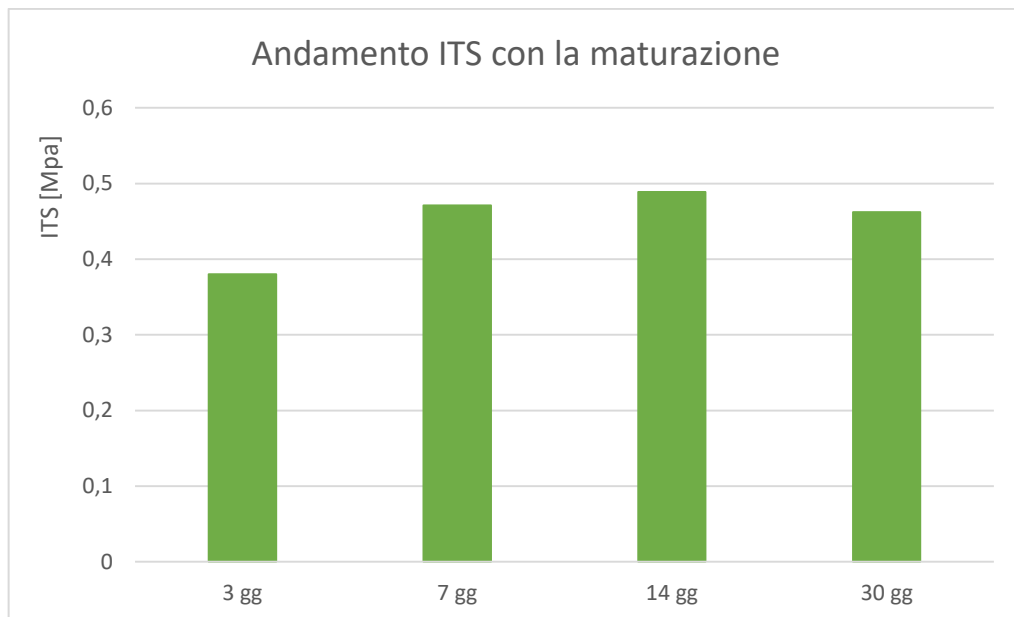


Figura 5.23 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia L

5.3.6 Valutazione della Sensibilità all'Acqua attraverso la prova ITS

Codice	Rottura in aria			Rottura in acqua			ITSr [MPa]
	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	ϵ_c	P [Kn]	ITS [Mpa]	
EL_1	0,018874	9,836	0,576	-	-	-	1,04
EL_2	-	-	-	0,0177	9,756839	0,573	
EL_3	0,055831	9,556	0,559	-	-	-	
EL_4	-	-	-	0,017657	10,63	0,626	
EL_5	0,03204	9,31003	0,546	-	-	-	
EL_6	-	-	-	0,017565	9,55	0,557	
			0,560			0,585	

Tabella 5.24 - Risultati rotture ITS per calcolo della sensibilità all'Acqua, per la famiglia L

Come è riportato nella *Tabella 5.24*, è stato inoltre calcolato il valore ITS ratio (Paragrafo 4.2.7.1), calcolato come:

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

I risultati sono stati anche graficati (*Figura 5.24*):

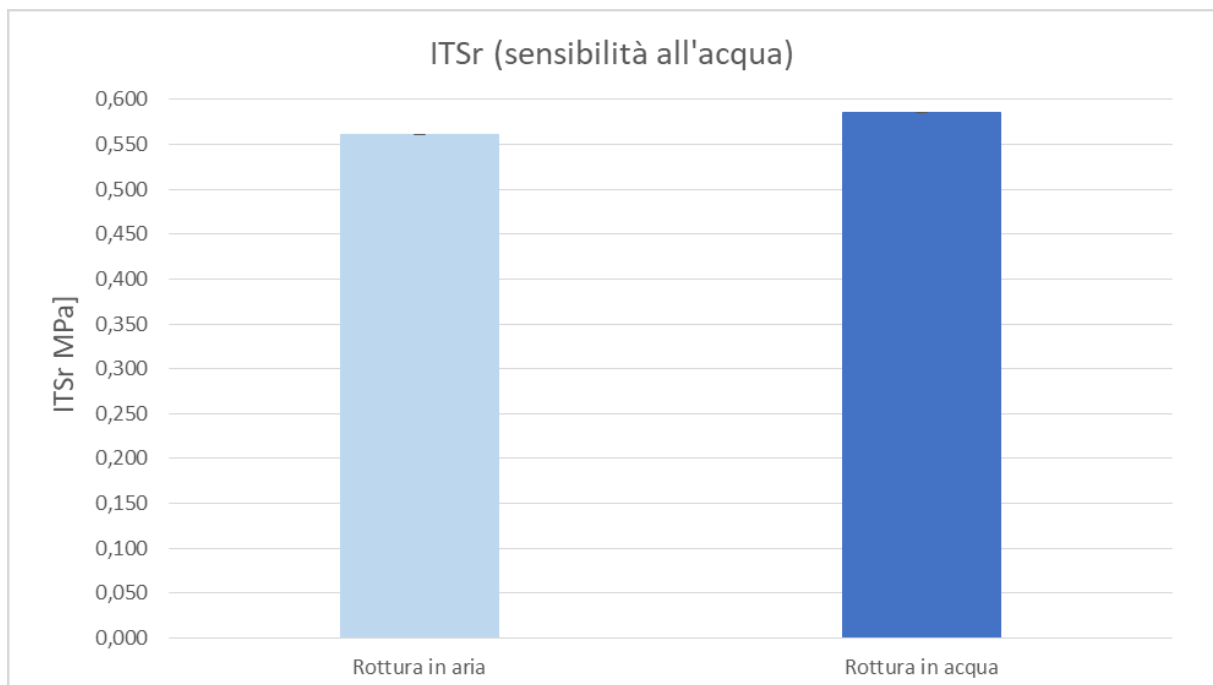


Figura 5.24 - Grafico riepilogativo risultati Sensibilità all'Acqua per la famiglia L

5.4 Confronto tra le famiglie

5.4.1 Parametri di lavorabilità

Di seguito vengono riportate le tabelle riassuntive dei parametri C_1 e k raggruppati per famiglia di impasti.

NORMALE	C_1 [mm]	k [$\%$]
media	59,855	3,492

Tabella 5.25 - Riepilogo parametri di lavorabilità Emulsione Normale

POLIMERI	C_1 [mm]	k [$\%$]
media	60,126	3,357

Tabella 5.26 - Riepilogo parametri di lavorabilità Emulsione modificata con Polimeri

LATTICE	C_1 [mm]	k [$\%$]
media	60,509	3,443

Tabella 5.27 - Riepilogo parametri di lavorabilità Emulsione con Lattice

Dai risultati si nota come non ci siano cambiamenti sostanziali in termini di lavorabilità tra gli impasti prodotti al variare della tipologia di emulsione.

5.4.2 Calcolo dei vuoti

Dal seguente grafico (Figura 5.25) è possibile notare una differenza (anche se minima), in termini di vuoti, tra le miscele realizzate con diversa tipologia di emulsione bituminosa. Tale differenza non è dovuta tanto al diverso tipo di emulsione impiegato, ma più che altro alla ripetibilità delle miscele/provini prodotte/i.

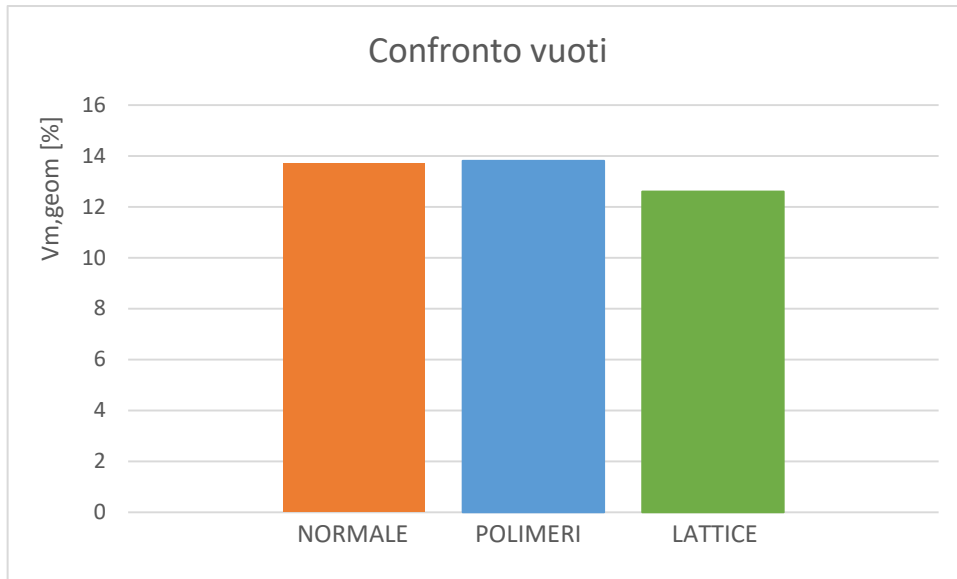


Figura 5.25 - Riepilogo e confronto vuoti

5.4.3 Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)

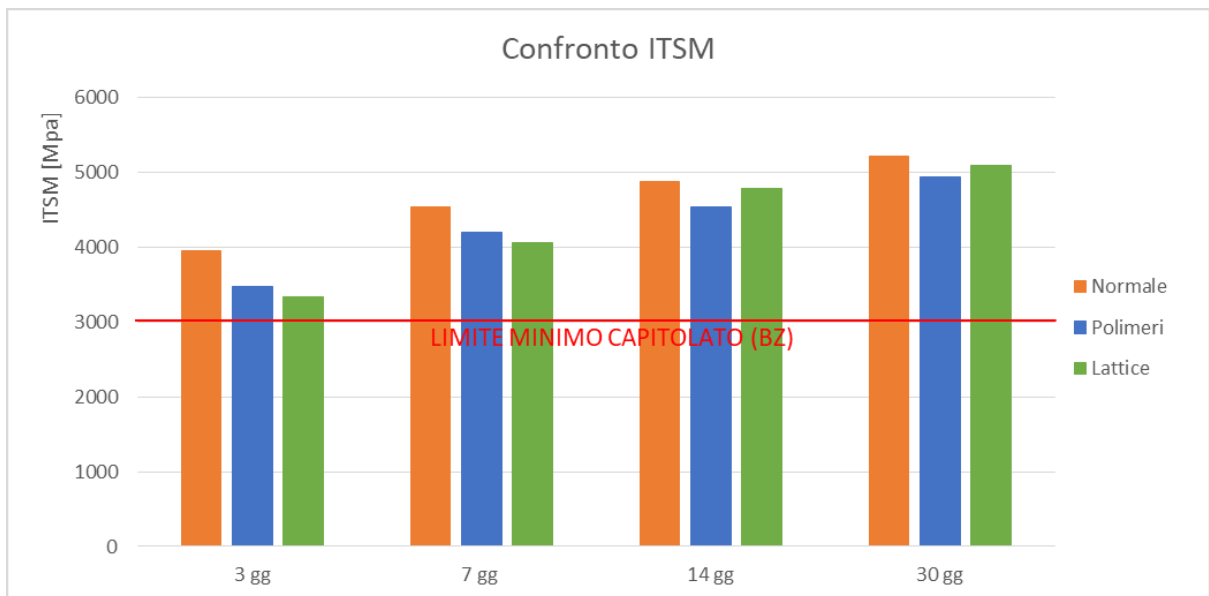


Figura 5.26 - Riepilogo e confronto valori ITSM

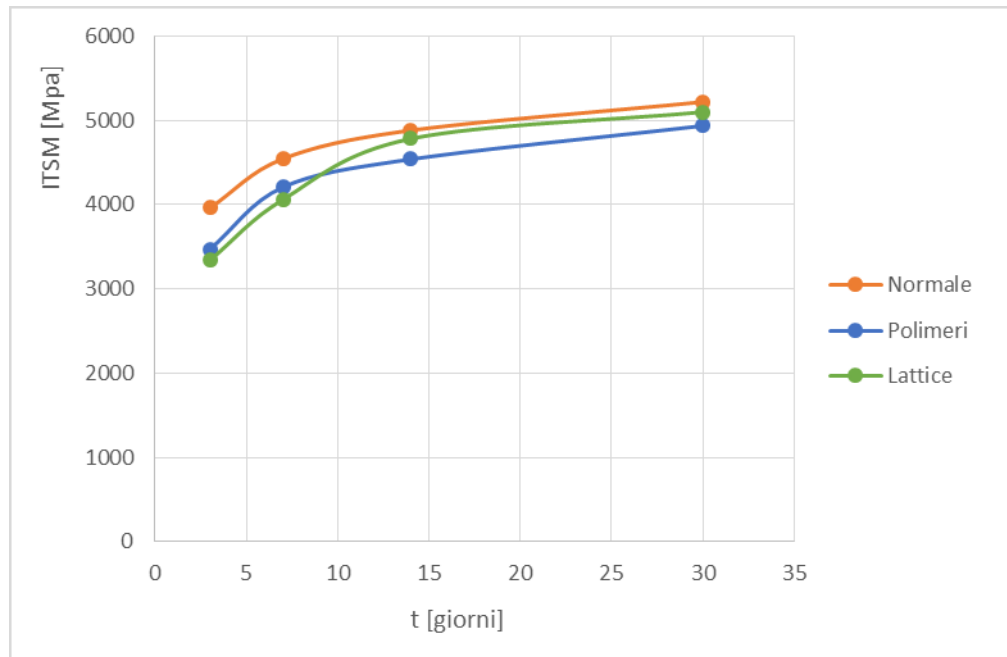


Figura 5.27 - Andamento valori ITSM nel tempo

Dal confronto tra i valori del modulo di rigidezza delle tre diverse famiglie, è evidente una tendenza di crescita del modulo con l'aumentare del grado di maturazione del cemento presente nell'impasto.

Inoltre, in *Figura 5.27*, è possibile notare anche che l'andamento del modulo per ogni emulsione, tende ad un asintoto orizzontale dopo 30 giorni. Questo indica che il materiale ha perso la quasi totalità dell'acqua, e le sue caratteristiche in termini di rigidezza dopo 30 giorni si mantengono costanti.

Confrontando le 3 emulsioni si evince che a ogni grado di maturazione la miscela con l'emulsione normale è più rigida rispetto alle altre due che contengono l'emulsione modificata. Tale differenza tra le tre diverse emulsioni si va poi a mitigare dai 30 giorni di maturazione in poi.

In ogni caso possiamo notare come tutte e tre le miscele soddisfano il limite minimo del Capitolato di Bolzano fissato a 3000 Mpa.

5.4.4 Rottura a Trazione Indiretta (ITS)

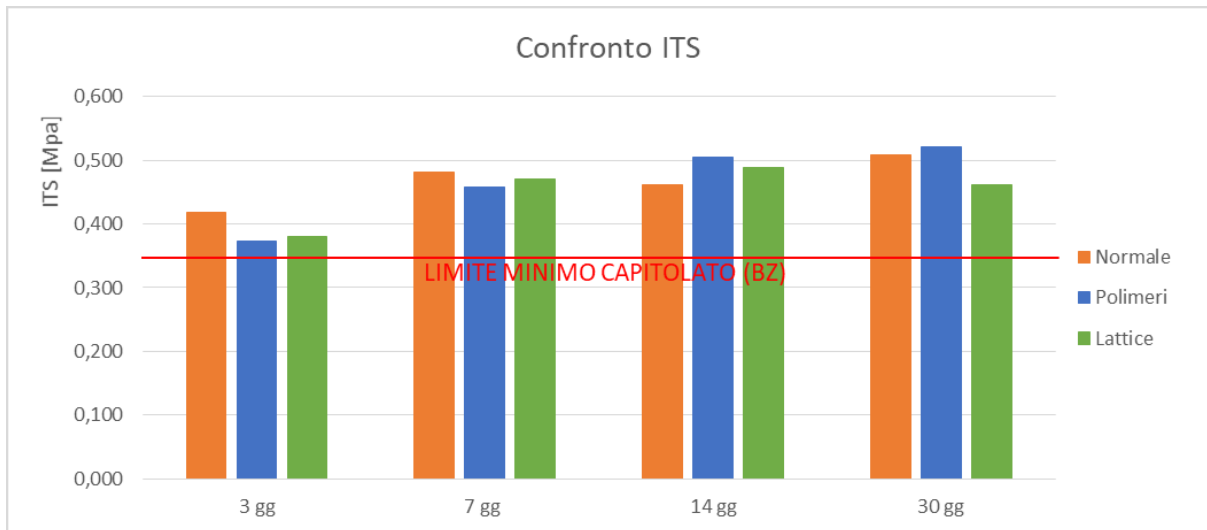


Figura 5.28 - Riepilogo e confronto valori ITS

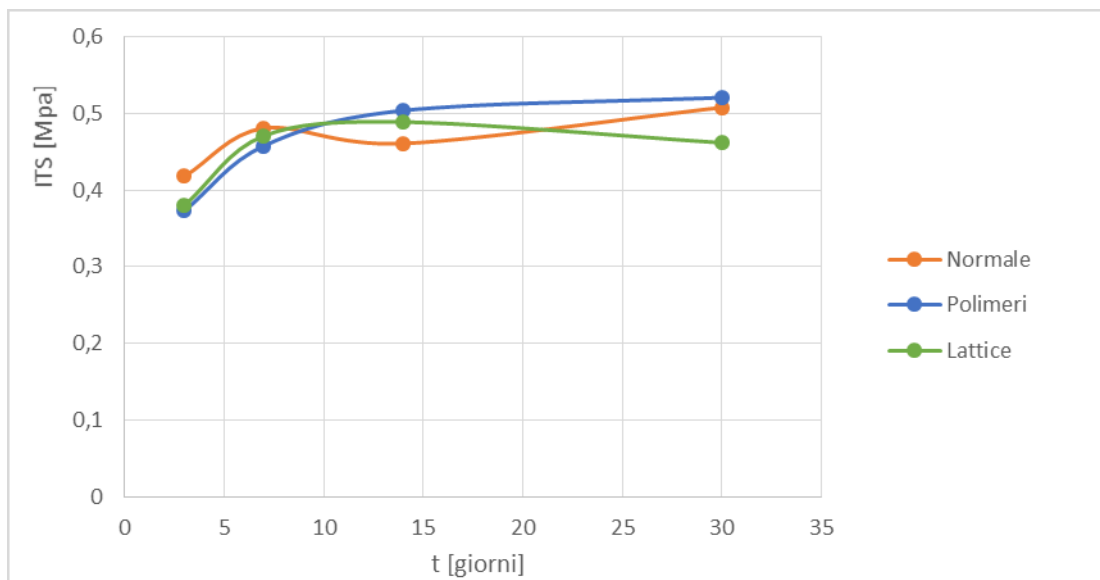


Figura 5.29 - Andamento ITS nel tempo

Confrontando i risultati delle prove di rottura ITS delle tre famiglie di miscele con diversa emulsione bituminosa, si nota un trend evolutivo crescente all'aumentare del grado di maturazione più evidente nella miscela con l'emulsione modificata con polimeri.

Anche per l'ITS il Capitolato di Bolzano fissa un valore minimo pari a 0.35 Mpa a 3 giorni che risulta essere soddisfatto da tutte e tre le famiglie.

5.4.5 Sensibilità all'acqua

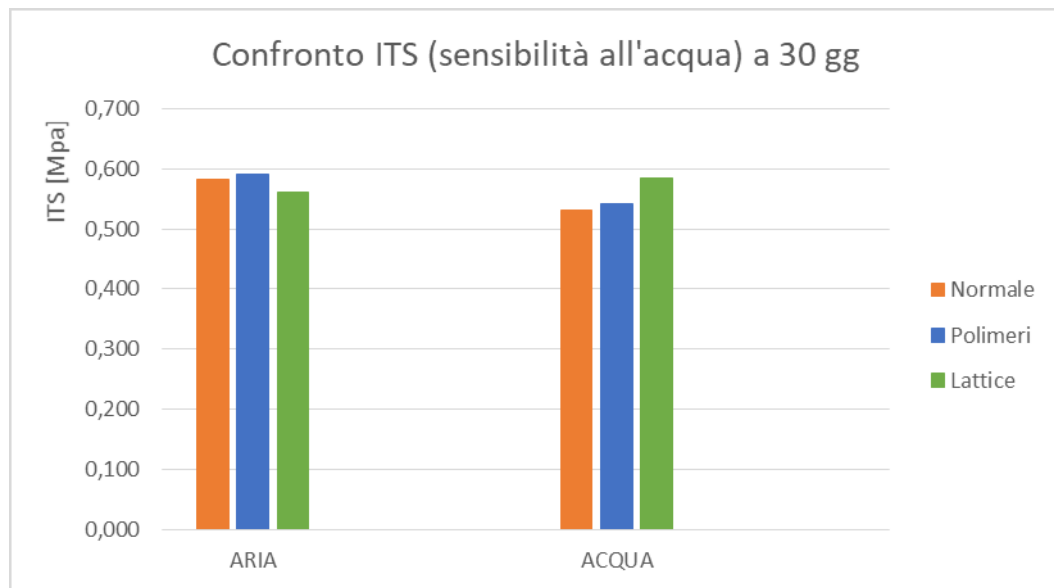


Figura 5.30 - Confronto ITS per la Sensibilità all'Acqua delle tre famiglie N, P, L

Vengono inoltre riportati i valori dell'ITS ratio.

Normale	ITSr [MPa]
	0,91

Tabella 5.28 - Riepilogo ITS ratio Emulsione Normale

Polimeri	ITSr [MPa]
	0,92

Tabella 5.29 - Riepilogo ITS ratio Emulsione modificata con Polimeri

Lattice	ITSr [MPa]
	1,04

Tabella 5.30 - Riepilogo ITS ratio Emulsione con Lattice

Dai risultati ottenuti si nota che nelle famiglie P e N c'è una leggera sensibilità all'acqua, mentre nella famiglia L non c'è differenza tra prove fatte in acqua o all'aria.

Capitolo 6 - Conclusioni

La sperimentazione oggetto della tesi è stata svolta al fine di studiare le prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo (Cold Recycled Mixtures, CRM) al variare del tipo di emulsione bituminosa. In particolare, sono state valutate 3 famiglie di miscele:

- Emulsione bituminosa normale, famiglia N
- Emulsione bituminosa modificata con polimeri, famiglia P
- Emulsione bituminosa con lattice, famiglia L

Per ogni famiglia sono stati realizzati 24 + 6 provini:

- dai 24 provini si sono ottenuti:
 - Curve di compattazione, parametri di lavorabilità e perdite di acqua
 - Modulo di rigidezza a trazione indiretta ITSM dopo 3, 7, 14, 30 giorni
 - Resistenza a rottura per trazione indiretta ITS dopo 3, 7, 14, 30 giorni
- dai 6 provini invece:
 - Resistenza a rottura per trazione indiretta ITSr per la valutazione della Sensibilità all'acqua.

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

- La diversa tipologia di emulsione non influenza in modo significativo la lavorabilità della miscela;
- Nelle miscele con emulsione con lattice, il contenuto di vuoti risulta essere inferiore rispetto a quella che si ha nelle miscele realizzate con emulsione normale e con emulsione modificata con polimeri, ma si ritiene tale differenza (circa 1 punto percentuale) conseguenza della ripetibilità di produzione delle miscele e dei provini;
- In generale, le tre emulsioni hanno un trend crescente in termini di ITSM e ITS all'aumentare del grado di maturazione della miscela;
- Nelle prove di modulo ITSM tra le varie tipologie di emulsione per ciascun grado di maturazione è possibile notare come quella normale (N) presenti un valore

leggermente più elevato rispetto alle altre due. Tale differenza è più alta all'inizio della maturazione e poi via via si attenua;

- Nelle prove di rottura ITS tra le varie tipologie di emulsione per lo stesso grado di maturazione è possibile notare che, fino ai 7 giorni, la miscela N raggiunge valori un po' più elevati rispetto alla miscela L, che a sua volta raggiunge valori leggermente più elevati rispetto alla miscela P; dai 7 ai 30 giorni la situazione tende a ribaltarsi mostrando valori ITS poco più elevati per la miscela P e leggermente più bassi per quella N;

Dall'analisi dei risultati delle prove di sensibilità all'acqua si evince come la miscela L sia quella che meno soffre la presenza di acqua, mentre le altre due miscele N e P hanno una leggera sensibilità all'acqua. In conclusione, l'effetto della tipologia di emulsione non influenza significativamente il comportamento della miscela sia in termini di lavorabilità e sia in termini prestazionali. Le piccole differenze visibili nelle varie prove meccaniche eseguite, sono da attribuire più che altro alla ripetibilità della produzione della miscela e della produzione dei provini. Tale risultato può essere spiegato dal fatto che il contenuto di legante all'interno dell'impasto (2.4%) non comporta una significativa variazione del comportamento delle miscele a causa delle numerose variabili in gioco nei conglomerati a freddo (tipologia bitume del fresato, curva granulometrica effettiva, contenuto d'acqua effettivo della miscela, quantitativo effettivo di cemento, ecc.).

Tale risultato è molto significativo ai fini pratici, poiché solitamente si utilizza l'emulsione P per la realizzazione degli strati di base, mentre dai risultati ottenuti è possibile affermare che è possibile sostituire tale emulsione con un'emulsione N, ottenendo un notevole risparmio economico.

Le prove eseguite in questa tesi rappresentano solo una parte del lavoro svolto per confrontare queste tre emulsioni. Infatti sono state parallelamente eseguite anche prove di fatica e di modulo complesso a compressione, che hanno dato conferma dei risultati ottenuti nella presente tesi.

In futuro, inoltre, è in programma l'esecuzione di campi prova, dove verranno messi in opera strati di base per ognuna delle tre tipologie di emulsione oggetto di questa tesi. In tali campi prova verranno eseguite prove di monitoraggio nel tempo attraverso prove non distruttive,

ed in più verranno prelevate carote da testare in laboratorio. Tale verifica è importante per monitorare cosa accade al materiale dopo aver subito il traffico veicolare reale.

Capitolo 7 - Bibliografia e Sitografia

[B1] Ippoliti Davide – Tesi magistrale “Influenza del tipo di emulsione sul livello prestazionale delle basi a freddo”

[B2] Di Litta Lorenzo – Tesi magistrale “Il dosaggio del filler nei conglomerati bituminosi riciclati a freddo”

[B3] Giuliani Matteo – Tesi magistrale “Efficacia delle fibre di rinforzo nei conglomerati bituminosi riciclati a freddo”

[S1] http://ingegneria.sba.unibo.it/risorse/files/relazioni-delle-conferenze-della-scuola-di-ingegneria-e-architettura/bucchi_testo

[S2] <https://futuraconglomerati.it/la-pavimentazione-stradale/>

[S3] <https://ilgiornaledellambiente.it/economia-sostenibile-cosa-e/#economiasostenibile>

[S4] <https://asvis.it/goal12/articoli/461-1802/obiettivi-di-sviluppo-sostenibile-ed-economia-circolare>

[S5] <https://www.mite.gov.it/pagina/i-criteri-ambientali-minimi>

[S6] https://www.casaclima.com/ar_46575_lavori-manutenzioni-stradali-inarrivo-criteri-ambientali-minimi-cam.html

[S7] https://amslaurea.unibo.it/1746/1/Rosa_Lucia_Tesi.pdf

[1] Austostrade SPA, 2004

Ringraziamenti

I miei più sentiti ringraziamenti va innanzitutto a tutti coloro che hanno contribuito alla stesura di questa tesi, a loro va tutta la mia stima e gratitudine.

Desidero ringraziare in primis il mio relatore, Prof. Ing. Maurizio Bocci, per avermi dato la possibilità di svolgere un'interessante sperimentazione su questo argomento e per la passione che ogni giorno mette nel lavoro che svolge.

Desidero inoltre ringraziare l'Ing. Carlo Carpani che mi ha assistito in tutto il tirocinio con grande pazienza e passione, permettendomi di concludere questo lavoro. A lui va il mio più caro augurio per una splendida carriera.

Un vero e sincero grazie va, soprattutto, a tutti i miei famigliari, ed in particolar modo a mio padre Luigi; troppo spesso do per scontato ciò che lui fa e ha fatto, ma non finirò mai di ringraziarlo. Non meno grande è il ringraziamento che va a Marina, per aver cucinato e lavato tutte le volte che io ero super indaffarata con gli esami togliendomi così parte del lavoro casalingo che sarebbe spettato a me. Ringrazio inoltre mio fratello Alessandro e mia cognata Eleonora, per esserci sempre ogni volta che ho bisogno di un aiuto o consiglio. Un grazie speciale va a mio nipote Filippo: non sa ancora leggere ma spero che un giorno, quando sarà in grado, capisca attraverso queste due righe quanto sia stato importante per me vedere il suo sorriso nei momenti difficili.

Ringrazio i colleghi con cui ho condiviso questo percorso, su tutti Alessia e Virginia: le gioie, gli scleri ed il reciproco aiuto accademico e psicologico non verranno mai dimenticati. È stata per me un'enorme gioia iniziare questo percorso come colleghe e finirlo come Amiche. Se non fosse stato per voi non avrei mai raggiunto questo traguardo. Vi auguro il meglio dalla vita.

Un grazie gigantesco va a tutti gli amici conosciuti durante questa tappa della mia vita ma anche a quelli che invece ci sono da sempre, vi voglio bene.

Per ultimo, ma non per importanza, ringrazio Stefano, colui che più di tutti ha condiviso con me le gioie e i dolori di questo percorso e senza alcun dubbio la persona migliore che io abbia mai incontrato. Mi hai supportata e soprattutto sopportata durante tutto questo percorso e se da oggi sono ingegnere è anche per merito tuo.