



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

## **Basi a freddo per pavimentazioni stradali con emulsioni modificate**

### **Cold bases layers for road pavements with modified bitumen emulsions**

*Relatore:*

***Prof. Ing. Maurizio Bocci***

*Correlatore:*

***Ing. Carlo Carpani***

*Tesi di Laurea di:*

***Emanuele Farina***

*Anno Accademico 2021 – 2022*

---

## Sommario

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.....	6
CAPITOLO 2 – STATO DELL'ARTE .....	8
2.1 LA STRADA NEL TEMPO .....	8
2.1.1 La strada nella Mesopotamia .....	8
2.1.2 La strada nell'epoca romana .....	8
2.1.3. La strada nell'epoca medievale .....	9
2.1.4. La strada nell'epoca rinascimentale .....	9
2.1.5. La strada fino ad oggi .....	9
2.2 STRATIGRAFIA STRADALE .....	11
2.2.1. Pavimentazione rigida .....	12
2.2.2. Pavimentazione semirigida.....	12
2.2.2.1. Terreno di sottofondo .....	13
2.2.2.2. Strato di fondazione .....	14
2.2.2.3. Strato di base.....	15
2.2.2.4. Strato di collegamento (binder).....	16
2.2.2.5. Strato (o tappeto) di usura .....	17
2.2.3. Pavimentazione flessibile.....	17
2.3. RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI: MATERIALI DA RICICLO .....	18
2.4. TECNICHE DI RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI.....	21
2.4.1. Riciclaggio a freddo in impianto fisso.....	22
2.4.1.1. Composizione e funzionamento di un impianto fisso .....	23
2.4.2. Riciclaggio a freddo in situ.....	24
2.4.2.1. Composizione e funzionamento del riciclaggio in situ.....	25
CAPITOLO 3 – MATERIALI .....	27
3.1. AGGREGATI LAPIDEI.....	27

---

3.2.	<i>RAP</i> .....	30
3.3.	<i>FILLER</i> .....	32
3.4.	<i>LEGANTI BITUMINOSI</i> .....	34
3.4.1.	<i>Emulsione bituminosa</i> .....	34
3.4.1.1.	<i>Emulsione normale – Rigeval MC (N)</i> .....	37
3.4.1.2.	<i>Emulsione modificata con polimeri SBS – Rigeval CM (P)</i> .....	39
3.4.1.3.	<i>Emulsione modificata con lattice – Rigeval LX (L)</i> .....	40
3.4.2.	<i>Bitume schiumato</i> .....	41
3.5.	<i>ACQUA</i> .....	42
3.6.	<i>CEMENTO</i> .....	43
3.7.	<i>REQUISITI DI CAPITOLATO DEI MATERIALI</i> .....	45
3.7.1.	<i>Conglomerato bituminoso di recupero</i> .....	45
3.7.2.	<i>Aggregati di integrazione</i> .....	45
3.7.3.	<i>Leganti: bitume</i> .....	46
3.7.4.	<i>Leganti: cemento</i> .....	46
3.7.5.	<i>Acqua</i> .....	47
3.7.6.	<i>Miscela di aggregati</i> .....	47
3.7.7.	<i>Studio della miscela</i> .....	47
<b>CAPITOLO 4 – TEST METHODS E PROGRAMMA SPERIMENTALE</b> .....		49
4.1.	<i>OBIETTIVO DELLA SPERIMENTAZIONE</i> .....	49
4.2.	<i>APPARECCHIATURE E PROTOCOLLI DI PROVA</i> .....	49
4.2.1.	<i>Analisi granulometrica</i> .....	49
4.2.2.	<i>Determinazione della miscela di progetto</i> .....	51
4.2.2.1.	<i>Miscela di progetto degli aggregati</i> .....	51
4.2.2.2.	<i>Miscela di progetto</i> .....	53
4.2.3.	<i>Denominazione dei provini</i> .....	53

---

---

4.2.3.1.	Denominazione dei provini per “prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)” e “prova a rottura a trazione indiretta (ITS) .....	53
4.2.3.2.	Denominazione dei provini per “prova a fatica” .....	54
4.2.4.	Preparazione dei provini .....	58
4.2.5.	Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31) .....	61
4.2.6.	Prova di modulo a trazione indiretta .....	66
4.2.7.	Prova di trazione indiretta .....	76
4.2.8.	Prova a fatica (UNI EN 12697-24).....	79
CAPITOLO 5 – ANALISI DEI RISULTATI.....		85
5.1.	EMULSIONE NORMALE (N) .....	85
5.1.1	Risultati prove di rottura a trazione indiretta (ITS).....	85
5.1.2.	Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM) .....	86
5.1.3.	Risultati prove di fatica (ITFT).....	87
5.2.	EMULSIONE MODIFICATA CON POLIMERI (P).....	88
5.2.1.	Risultati prove di rottura a trazione indiretta (ITS).....	89
5.2.2.	Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM) .....	89
5.2.3.	Risultati prove a fatica (ITFT).....	90
5.3.	EMULSIONE CON LATTICE (L).....	92
5.3.1.	Risultati prove di rottura a trazione indiretta (ITS) .....	92
5.3.2.	Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM) .....	93
5.3.3.	Risultati prove a fatica (ITFT).....	93
5.4.	CONFRONTO TRA I RISULTATI DELLE DIVERSE FAMIGLIE .....	95
5.4.1	Modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM) .....	95
5.4.2.	Rottura a trazione indiretta (ITS).....	96
5.4.3.	Prova a fatica (ITFT) .....	97
CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI .....		98

---

---

6.1. <i>MODULO DI RIGIDEZZA A TRAZIONE INDIRETTA (ITSM) E RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA (ITS)</i> .....	98
6.2. <i>PROVA A FATICA (ITST)</i> .....	99
6.3. <i>CONSIDERAZIONI FINALI</i> .....	99
CAPITOLO 7 – <i>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</i> .....	101

---

# CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

La strada è un'infrastruttura di trasporto fruibile da parte dei veicoli terrestri e dei pedoni, oltre che da animali, anche se in misura molto più marginale. L'insieme delle strade che insistono in un territorio più o meno ampio è chiamato rete stradale.

La pavimentazione stradale è una struttura poggiante su di un rilevato, collocata in trincea o posta sul terreno in sito, costituita da diversi strati, ciascuno dei quali è realizzato con spessore e materiali diversi, in modo che svolgano ciascuno la propria funzione una volta messi in opera con tecnologie differenti tra loro. Le funzioni della pavimentazione sono molteplici, riassumibili in tre punti:

1. Sopportare i carichi indotti dal traffico sovrastante, trasmettendoli e distribuendoli sul terreno sottostante, chiamato sottofondo.
2. Assicurare agli utilizzatori dell'infrastruttura una superficie di adeguate caratteristiche, sia in termini di regolarità che di aderenza, in modo da garantirne il confort e la sicurezza.
3. Salvaguardare i diversi strati della pavimentazione stradale stessa, nonché del sottofondo.

Lasciando per il momento da parte il discorso della realizzazione della pavimentazione stradale, un ruolo fondamentale è anche ricoperto dalla sua demolizione e relativo smaltimento, in quanto la demolizione (completa o parziale) della pavimentazione stradale dà vita ad un materiale noto come RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o fresato, il quale veniva portato direttamente in discarica e trattato come rifiuto speciale.

Nel corso degli ultimi decenni però l'incredibile sviluppo economico ha generato un inevitabile incremento del traffico veicolare, soprattutto per quanto riguarda i mezzi pesanti, andando incontro ovviamente ad un degrado molto più accelerato del corpo stradale, con una conseguente necessità di interventi di ripristino e manutenzione.

Fortunatamente, di pari passo allo sviluppo economico ed industriale è andata accrescendosi anche l'attenzione verso l'impatto ambientale causato dalle varie attività umane, con la ricerca sempre più spinta di tecniche destinate al trattamento ed al riutilizzo delle materie prime già impiegate, nonché alla salvaguardia delle risorse naturali. Rimanendo però

---

nell'ambito stradale possiamo distinguere due macrocategorie di riciclaggio della pavimentazione stradale e cioè il riciclaggio a caldo ed il riciclaggio a freddo. Quest'ultimo è l'oggetto della tesi, la quale è volta al confronto prestazionale di diversi strati di base della pavimentazione stradale, ciascuno dei quali è stato realizzato con una diversa tipologia di emulsione bituminosa tra quelle maggiormente impiegate in campo stradale in Italia.

La suddetta 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 prevede le seguenti prove:

- Prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- Prove di fatica a trazione indiretta (ITFT);
- Prove di rottura a trazione indiretta (ITS).

La presente tesi verrà sviluppata e commentata in 7 capitoli, in particolare:

- *Capitolo 1* – Introduzione;
- *Capitolo 2* – Stato dell'arte:  
Verrà presentata una breve storia dello sviluppo delle pavimentazioni stradali, soffermandosi in particolare sulla composizione attuale delle stesse.  
Verranno illustrate le varie tecniche di riciclaggio delle pavimentazioni stradali, ponendo particolare attenzione sulla tecnica a freddo;
- *Capitolo 3* – Materiali:  
Verranno illustrati tutti i materiali impiegati nella presente sperimentazione, partendo dapprima sulle generalità, per poi scendere nel particolare di quelli utilizzati nella presente tesi;
- *Capitolo 4* – Programma sperimentale e metodi di prova:  
Verranno elencate le varie procedure seguite in laboratorio, il confezionamento delle miscele ed il programma sperimentale alla base delle prove oggetto di tesi;
- *Capitolo 5* – Analisi dei risultati:  
Verranno esposti tutti i risultati derivanti dalle varie prove, opportunamente commentati anche attraverso grafici e messi reciprocamente a confronto;
- *Capitolo 6* – Conclusioni;
- *Capitolo 7* – Bibliografia e sitografia.

---

# CAPITOLO 2 – STATO DELL'ARTE

## **2.1 LA STRADA NEL TEMPO**

### **2.1.1 La strada nella Mesopotamia**

Nel 5.500 a.C. circa, in Mesopotamia, viene fatta una delle invenzioni più straordinarie, ovvero la ruota. Proprio dall'ideazione di questa tecnologia, per i tempi rivoluzionaria, nasce la necessità di realizzare le prime strade, in modo da far circolare i carri con ruote su delle vie preferenziali regolari.

Arrivati al 600 a.C. la Mesopotamia poteva già godere di una rete stradale di ben 2.500Km.

### **2.1.2 La strada nell'epoca romana**

Per quanto riguarda la configurazione stradale, i romani misero a punto una configurazione basata sulla conformazione degli accampamenti militari (chiamato castrum). Tale schema era basato su due assi perpendicolari:

- Cardo, molto spesso in direzione nord – sud;
- Decumano, in direzione est – ovest.

Le strade avevano anche un'enorme importanza dal punto di vista simbolico oltre che funzionale, in quanto in corrispondenza degli incroci tra cardo e decumano si svolgevano riunioni politiche, veniva amministrata la giustizia, si esercitava il commercio e si svolgevano cerimonie religiose. Per quanto riguarda la loro costruzione veniva scavata una fossa, riempita con diversi materiali, diversi a seconda della località, del terreno e dei materiali a disposizione.

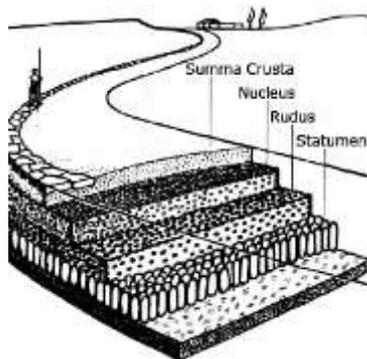


Figura 2.1: sezione strada romana

---

Le strade, anche se i materiali o il terreno potevano essere diversi, venivano costruite secondo un criterio ben preciso:

- Uno strato più profondo, chiamato *statumen*, costituito da sassi ed argilla;
- Uno strato ad esso sovrastante, chiamato *rudus*, realizzato con pietre, mattoni rotti, sabbia, il tutto impastato con della calce;
- Un terzo strato denominato *nucleus*, formato da pietrisco e ghiaia;
- Un quarto strato, quello in sommità, costituito da lastre di pietre levigate di pietra che combaciavano le une sulle altre.

Il termine "strada" deriva proprio da tale conformazione a strati, detta "*viae stratae*".

### **2.1.3. La strada nell'epoca medievale**

Con la caduta dell'Impero Romano nel 476 a.C. inizia purtroppo la decadenza della rete stradale europea, in quanto vennero trascurate o volutamente distrutte in modo da isolarsi da scorrerie barbariche.

A differenza di quanto accadde durante l'età romana, le strade medievali si contraddistinguevano per la loro estrema povertà strutturale, in quanto apparivano come delle mulattiere, percorribili a piedi o al più a dorso di un cavallo o di un mulo, dato che in tale periodo era caduto quasi del tutto in disuso il trasporto mediante veicoli a ruote, anche perché le ridotte dimensioni di tali strade non permettevano il passaggio dei carri in molte tratte.

### **2.1.4. La strada nell'epoca rinascimentale**

Recentemente è stato rinvenuto un tratto di strada risalente al XIV-XVI secolo a Meldola, in provincia di Forlì-Cesena in Emilia-Romagna, avente una lunghezza di circa 5 metri ed una larghezza di 1,10 metri. I resti rilevati sono sufficienti a definire le caratteristiche costruttive: il piano stradale è costituito da ciottoli, sassi, frammenti laterizi e cocchiopesto, sovrastati da sassi fluviali posti di piatto sull'intero piano stradale, dove si distinguono ancora tracce di orme carraie [51].

### **2.1.5. La strada fino ad oggi**

A meno di rare realizzazioni di età rinascimentale in ricchi contesti urbani, la strada non ebbe

---

più il ruolo e le funzioni ricoperte nell'epoca romana, in quanto i rinati commerci, seppur molto intensi, erano limitati alle vie d'acqua. La conoscenza delle stesse tecniche costruttive romane, dimenticate per molti secoli, tornò a diffondersi e a destare interesse solo grazie alle ristampe seicentesche e settecentesche delle traduzioni degli scritti di Vitruvio.

Alla fine del diciottesimo secolo vennero finalmente esplicitati nei capitolati d'opera locali i concetti di "stabile", "comodo" e "bello", quali devono essere propri di una strada, alla luce del nuovo incremento del commercio via terra. Per quanto riguarda la stabilità, nei capitolati si diceva quanto segue:

*"la stabilità pertanto abbia principio dal fondo, sul quale vuoi edificare la nuova strada. Se la natura in quel luogo ne sia difettosa, si procuri a supplire tosto coll'arte al difetto, sostituendo al fondo cattivo de' sassi oppure dell'arena non già in altezza di poco più di un pollice, come noi attualmente accostumiamo, a imitazione dei romani in altezza di due o tre piedi a seconda delle circostanze. Si piantino dunque sul sodo e si faccia sotto i lastrici l'opportuno fondamento descritto, e allora avremo stabile la strada e il lastrico."*

Limitati a vie di sottoportico e a poche piazze, i rivestimenti stradali, con la sola tecnica degli elementi lapidei e ciottolato, sono comunque sporadici a partire dal Seicento e la loro diffusione in Italia e in Europa è quantitativamente significativa solo a partire dal tardo periodo napoleonico.

Nello stesso periodo la soprastruttura della strada ordinaria iniziò ad essere concepita come quella parte superficiale della strada che si trova ad immediato contatto con il carreggio e che, per azione di questo e per quella delle intemperie, si consuma molto prima e va periodicamente riparata o rinnovata.

Fino ai primi anni del 1900 era usuale una distinzione della forma e della struttura della strada a seconda che essa si trattasse di una strada interna o esterna ad un centro abitato: nel primo caso veniva adottato un sistema di costruzione più regolare e duraturo, cioè richiedente manutenzione meno frequentemente e su aree poco estese, formando così sulla superficie della strada un vero pavimento regolare di pietra, di legno o di laterizio; nel secondo caso invece veniva realizzato semplicemente sulla superficie stradale una copertura di materiale lapideo sciolto, chiamato all'epoca "inghiaiato".

---

Nella prima metà del Novecento, la necessità di garantire regolarità ai percorsi carrabili dei veicoli motorizzati determinò l'impiego indiscriminato di asfalto nei nuovi ed antichi percorsi carrabili e pedonali, anche a causa della progressiva carenza dei materiali e della perdita di conoscenze tecniche proprie delle lavorazioni tradizionali.

Nel periodo post-bellico ci fu un processo molto rapido e non sempre lucido della ricostruzione, tanto che si assiste alla rimozione o addirittura all'asfaltatura di pavimentazioni antiche in pietra e laterizio, fino ad omogeneizzare ed annullare le peculiarità costruttive di molte città aventi culture e progressi storici tra loro differenti.

In Italia, a partire dagli anni 80, l'introduzione di nuovi materiali di produzione industriale, come calcestruzzi ad alta resistenza e materiali compositi, i quali risultano più durevoli ed economici, ha portato la più generica tipologia di pavimentazione "ad elementi" ad essere impiegata in contesti del tutto differenti rispetto a quelli più tradizionali e a costituire una valida alternativa alle soluzioni di tipo continuo, siano esse in conglomerato bituminoso o in calcestruzzo [B1].

## **2.2 STRATIGRAFIA STRADALE**

Con il termine 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 del corpo stradale sono quelle di garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di sicurezza e comfort durante la guida. Un altro compito al quale deve adempiere la pavimentazione stradale è quello di garantire che gli agenti atmosferici non filtrino all'interno dei vari strati, causando danni alla sua integrità, con conseguente deformazioni del manto stradale più superficiale e perdita dei requisiti di comfort e sicurezza.

In definitiva la pavimentazione stradale non deve soddisfare dei requisiti prettamente strutturali, ma anche a requisiti funzionali: nei requisiti strutturali troviamo la *portanza*, ovvero la capacità di sopportare il continuo carico veicolare e la *durabilità*, cioè la capacità di resistere alla normale usura di utilizzo, oltre che agli agenti atmosferici; per quanto riguarda invece i requisiti funzionali abbiamo la *regolarità* e l'*uniformità* del manto stradale, nonché la

---

garanzia di *aderenza* in ogni condizione ambientale tra lo pneumatico e lo strato di usura della pavimentazione.

Come già evidenziato, tradizionalmente la pavimentazione stradale è costituita da diversi strati sovrapposti tra di loro e realizzati con materiali differenti. Ciascuno strato è posizionato ad un livello preciso della pavimentazione stradale e assolve a funzioni specifiche. Per questi motivi presenta delle caratteristiche distintive che differiscono sia in ragione della tipologia costruttiva della struttura stradale, sia in funzione delle sollecitazioni ambientali e di traffico, a cui la stessa dovrà far fronte nel corso del suo arco vitale utile. In base alla diversa combinazione degli strati e alla scelta dei materiali costituenti, si potrà avere sulla pavimentazione stradale una diversa distribuzione dei carichi sul terreno di fondo e conseguentemente un diverso comportamento in esercizio motorio dei mezzi transitanti [S2].

A seconda dei materiali impiegati nella sua realizzazione, possiamo distinguere tre tipologie di pavimentazione stradale:

1. Pavimentazione rigida;
2. Pavimentazione semirigida;
3. Pavimentazione flessibile.

### **2.2.1. Pavimentazione rigida**

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.

### **2.2.2. Pavimentazione semirigida**

È questo il tipo di pavimentazione che è stato oggetto di tale sperimentazione. Essa in generale è composta da cinque strati:

1. Terreno di sottofondo;
2. Strato di fondazione;
3. Strato di base;
4. Strato di collegamento (binder);
5. Strato (o tappeto) di usura.

---

## STRATIGRAFIA DI UNA PAVIMENTAZIONE STRADALE SEMIRIGIDA

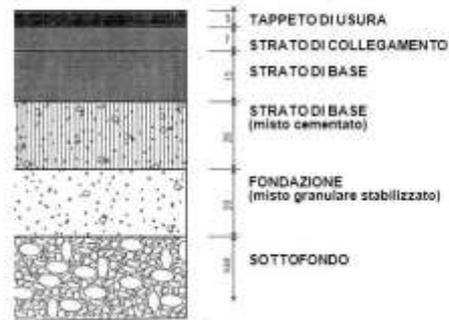


Figura 2.2.: sezione pavimentazione semirigida

### **2.2.2.1. Terreno di sottofondo**

Il terreno di sottofondo è il terreno sul quale è poggiata la sovrastruttura, cioè quello più direttamente interessato dall'azione dei carichi esterni da essa trasmessi. Il terreno di sottofondo può essere formato da terreno di scavo o da terre di riporto, ottenendo rispettivamente una *sezione in trincea* e una *sezione in rilevato*.

Per quanto riguarda lo spessore del terreno di sottofondo, le azioni trasmesse dai carichi veicolari si smorzano andando in profondità e nella generalità dei casi, oltre 1,50 – 2,00 metri si può ritenere che non influenzino lo stato tensionale dovuto ai carichi permanenti; al contrario, in funzione dell'entità delle pressioni applicate sul piano di sottofondo e alla capacità di ripartizione dei carichi da parte del materiale impiegato, lo stato tensionale nel sottofondo risulta particolarmente significativo fino ad una profondità di 0,50 – 1,00 metri.

Le prestazioni meccaniche dei sottofondi vengono espresse tramite il concetto di *portanza*, intesa come il carico che, in condizioni di sollecitazione note, provoca un cedimento prefissato, distinguendo tra l'aliquota di cedimento reversibile da quello irreversibile. Nel concetto di portanza è quindi incluso quello di *rigidezza*, legato alle deformazioni reversibili e quello di *resistenza al danno*, legata alle deformazioni irreversibili.

Un'elevata rigidezza del sottofondo è richiesta sia in fase di realizzazione della pavimentazione (in modo tale che favorisca una buona compattazione degli strati sovrastanti), sia in fase di esercizio (per limitare le deformazioni degli strati superiori dovute ai carichi veicolari). La portanza viene definita 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 [B2].

Il terreno di sottofondo deve rispettare alcune caratteristiche fornite dalla norma CNR-UNI 10006, sia dal punto di vista granulometrico che di portanza, in quanto il comportamento di tale strato influenza la riuscita e la durata nel tempo e la durata nel tempo della sovrastruttura.

### **2.2.2.2. Strato di fondazione**

Lo strato di fondazione, avente un range di spessori che va dai 15cm ai 35cm, è il penultimo strato più profondo ed il primo livello di materiale lavorato ad essere a contatto diretto con il terreno di sottofondo. Il ruolo dello strato di fondazione è quello di trasferire i carichi al sottofondo e costituire una superficie regolare per la stesa dei sovrastanti strati legati.

Tale strato può essere realizzato in vari modi:

- 1. Misto granulare:** è costituito da una miscela di aggregati, normalmente di granulometria controllata e priva di leganti aggiunti.

Sono idonei alla produzione del misto granulare gli aggregati conformi alla norma UNI EN 13242 (naturali, artificiali, riciclati), inclusi i rifiuti inerti, opportunamente prelaborati con processi fisico-meccanici (es. riduzione volumetrica, vagliatura, selezione, deferrizzazione, ecc.) atti a favorirne il successivo recupero, e/o materie prime secondarie anch'esse derivanti dal recupero di rifiuti. Non essendo prevista la fase di miscelazione con un legante, gli aggregati utilizzati per realizzare la fondazione in misto granulare sono nella stragrande maggioranza dei casi a frazione unica: la miscelazione di classi di aggregati è possibile realizzarla ma costituisce un costo aggiuntivo.

Gli aggregati impiegati dovranno essere qualificati in conformità alla direttiva 89/106/CEE sui prodotti da costruzione. Ciascuna fornitura dovrà essere accompagnata dalla marcatura CE attestante la conformità secondo la norma europea armonizzata UNI EN 13242. Per miscele di aggregati riciclati si rimanda all'appendice A della UNI EN 13285.

- 2. Misto cementato:** è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego e/o di aggregati riciclati, con o senza additivi (filler) addizionata di cemento e acqua per

---

attivare reazioni idrauliche. Il misto cementato è impiegato nelle pavimentazioni stradali anche per la costruzione dello strato di base.

Questa risulta essere la soluzione idonea alla realizzazione di strati di fondazione di pavimentazioni soggette ad elevato traffico pesante, in quanto a differenza del misto cementato garantisce una maggiore capacità portante, una diminuzione della deformabilità e quindi una maggiore durabilità.

Sono idonei alla produzione del misto cementato gli aggregati conformi alla norma UNI EN 13242, naturali, artificiali, riciclati.

Il cemento deve essere conforme alla UNI EN 197-1.

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

3. **Materiali stabilizzati:** in alternativa al misto granulare, a causa della difficoltà di reperire miscele di aggregati di buona qualità (come capita in diverse Regioni italiane) oppure per una precisa scelta economica ed ambientale (riduzione del prelievo da cave), si possono utilizzare per gli strati di fondazione terre naturali o materiali di riciclo (C&D – scarti di costruzione e materiali di demolizione di opere edili e di costruzioni stradali) stabilizzati con calce, calce e cemento, (solo) cemento, cemento ed un legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato).
4. 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).

### **2.2.2.3. Strato di base**

Lo strato di base risulta solitamente realizzato in conglomerato bituminoso a caldo, sia con bitume normale che con bitume modificato. La principale funzione svolta nella pavimentazione è di tipo strutturale, dovendo esso trasferire agli strati sottostanti, in maniera adeguatamente attenuata, i carichi verticali e orizzontali in modo che non si verifichino deformazioni o rotture. Per il suo confezionamento a caldo è ammesso l'impiego di fresato in quantità non superiore al 30% in peso rispetto agli aggregati così come prescritto dalle norme tecniche di Capitolato Anas. Il Capitolato Anas consente di realizzare lo strato di base anche tramite riciclaggio a freddo (con impiego di bitume schiumato o emulsione bituminosa). In tal

---

caso, la miscela risulta composta da almeno il 70% di materiale fresato. In caso di miscelazione in impianto la percentuale di fresato può essere integrata con un 30% massimo di aggregato naturale a correzione della curva granulometrica, mentre in sito si impiega il 100% di materiale fresato. Nel caso di 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%). 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. Il conglomerato bituminoso riciclato a freddo può essere realizzato con impianti mobili (installati provvisoriamente vicino al cantiere), o direttamente in situ mediante un "treno" di riciclaggio costituito da: fresa, macchina stabilizzatrice (tale da disgregare i grumi del conglomerato fresato e miscelare omogeneamente l'emulsione ed il cemento), autobotte per l'acqua, autobotte per l'emulsione, livellatrice, rullo vibrante e rullo gommato. A prescindere dalla modalità realizzativa, va sempre previsto l'ancoraggio dello strato di base allo strato sottostante (fondazione o sottobase) mediante stesa di opportuna mano d'ancoraggio in legante bituminoso. Infatti, nel caso di pavimentazioni semirigide, lo strato legato della base sovrasta uno strato non legato sottostante, chiamato appunto sottobase, realizzato generalmente in misto cementato, necessario in strade ed autostrade con un volume di traffico pesante non indifferente.

Per quanto riguarda gli spessori dello strato di base, ricoprendo esso una funzione principalmente strutturale, abbiamo un range molto variabile, in quanto dipende dalla qualità del sottofondo, dal clima e dalla quantità di traffico pesante: andiamo da spessori dell'ordine degli 8cm, fino ad arrivare anche a 35-40cm nel caso in cui le condizioni di carico siano particolarmente gravose o se il sottofondo presenta scarse proprietà

#### **2.2.2.4. Strato di collegamento (binder)**

Lo strato di binder, detto anche di "collegamento", è uno strato di transizione tra quello di base e quello più superficiale del manto di usura. Esso svolge essenzialmente una funzione

---

di regolarizzazione dello strato di base per poter garantire una adeguata pendenza e planarità, per rendere più semplice la stesa del sovrastante manto di usura. Esso inoltre fornisce un contributo per assorbire le azioni flessionali indotte dai carichi. In genere è realizzato in conglomerato bituminoso chiuso o semichiuso.

### **2.2.2.5. Strato (o tappeto) di usura**

Lo strato (o tappeto) di usura 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.

### **2.2.3. Pavimentazione flessibile**

La composizione di una pavimentazione flessibile è molto simile a quella di una pavimentazione semirigida: la differenza sta nel fatto che per lo strato di base non viene utilizzato il misto cementato, bensì viene impiegato esclusivamente uno strato in conglomerato bituminoso.

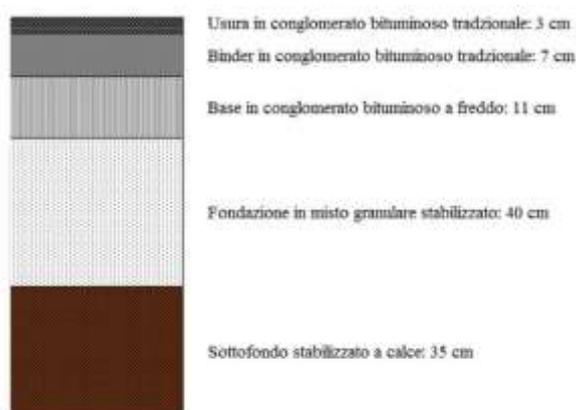


Figura 2.3.: Sezione pavimentazione flessibile

---

## **2.3. RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI:**

### **MATERIALI DA RICICLO**

Nel settore delle pavimentazioni stradali con il termine riciclare si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato al fine di produrre un nuovo conglomerato bituminoso. Ci sono molteplici vantaggi che portano a tale operazione:

- Riduzione dell'impiego di materie prime vergini;
- Riduzione del quantitativo di materiale da portare a discarica e di conseguenza una riduzione di zone da destinare a discarica;
- Limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera;
- Conservazione dell'energia;
- Vantaggi economici e tecnici.

In Italia, al contrario di come avviene in molti altri paesi industrializzati, la tecnica del reimpiego del fresato non ha avuto ancora un largo utilizzo. Da una stima approssimata sulla quantità di materiale di recupero proveniente dalla demolizione delle pavimentazioni stradali degradate, risulta che la quantità di conglomerato bituminoso fresato è pari a circa 12 milioni di tonnellate, su un totale di quasi 40 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotto annualmente, con una percentuale di reimpiego stimata intorno al 15% (circa 1.8 milioni di tonnellate). Tale dato risulta molto inferiore rispetto a quello dei maggiori paesi sviluppati, dove si recupera oltre l'80% dello stesso materiale fresato [B3].

Ormai sono numerosi i materiali che sono stati studiati per un possibile impiego nel corpo dei rilevati e nelle pavimentazioni stradali. Essi provengono:

- Dal settore stesso delle costruzioni stradali o edili, come il conglomerato bituminoso di recupero (*fresato o rap*) e i rifiuti da costruzioni o demolizioni (C&D);
- Da altre industrie e disponibili in quantitativi tali da poter soddisfare l'esigenza di grandi volumi di materiali richiesti dalle costruzioni stradali, come il *polverino di gomma* e varie *scorie*, come quelle nere, quelle bianche o quelle da incenerimento.

La componente principale delle miscele riciclate è il conglomerato bituminoso di recupero o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), cioè il materiale che si ottiene dalla fresatura oppure dalla

---

scarifica degli strati in conglomerato bituminoso delle pavimentazioni stradali giunte alla fine della loro vita utile.

Il fresato, ovvero il materiale dismesso da vecchi pacchetti stradali la cui pavimentazione risulta essere danneggiata per fessurazione o degrado, è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da una scarsa percentuale di fini e contenente bitume invecchiato, cioè bitume che con il tempo ha modificato le sue proprietà chimico-fisico.

La rimozione della pavimentazione o di un solo strato avviene per mezzo di opportuni macchinari (fresatrice, escavatore, ripper, scraper, ecc.) che producono blocchi a lastre irregolari di conglomerato bituminoso da frantumarsi, se necessario, in seguito.

La scelta dell'attrezzatura più idonea per l'operazione di rimozione è funzione dello spessore dello strato da demolire, che dipende dallo stadio e dall'entità del degrado; si opera con una fresatrice che arriva a rimuovere conglomerato fino ad una profondità di 50 mm per singola passata, mentre se si vuole togliere completamente la sovrastruttura si ricorre a bulldozer o a sistemi pneumatici.

Al termine della demolizione, il fresato ottenuto può essere sottoposto a due processi di confezionamento del conglomerato bituminoso:

- trasportato in centrale dove verrà trattato con processi di schiacciatura, vagliatura, raccolta e stoccaggio, il cui processo è definito con il termine riciclaggio a caldo;
- polverizzato in sito (con il pulvimixer) e successiva incorporazione negli strati granulari, fondazione o strati di base ad opera di mezzi semoventi; in questo caso si parla di riciclaggio a freddo.

Nel caso in cui il vecchio legante contenga un'alta percentuale di elementi cancerogeni (PAHs) non è possibile il suo reimpiego nella realizzazione di nuove strade attraverso la tecnica del riciclaggio. Infatti, preliminarmente alla definizione del *Mix Design* di progetto, in cui si determinano i requisiti qualitativi e quantitativi di ogni componente al fine di ottenere una miscela equilibrata, è opportuno analizzare le caratteristiche del conglomerato di recupero attraverso il prelievo di campioni e successiva analisi in laboratorio per definire i seguenti aspetti:

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

Le caratteristiche del legante originario sono importanti sia per assicurarsi che esso sia in grado di recuperare, durante la fase di rigenerazione, tutte le caratteristiche perse a seguito dell'invecchiamento e conseguente ossidazione, sia per verificare che non diventi eccessivamente "rigido" a causa degli aggregati, elementi principali del fresato di origine calcarea o silicea. È importante stabilire la loro natura e a tal proposito è buona regola predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la compatibilità col legante, l'opportuna lavorabilità dell'impasto e l'idonea presa finale.

Le caratteristiche prestazionali del RAP sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione del conglomerato d'origine (strato di base, strato di usura, strato di collegamento, chiamato binder) che determina sostanziali differenze sulla natura, qualità e pezzatura degli aggregati. Ad esempio, in uno strato d'usura, per conferire un'aderenza accettabile, gli aggregati devono essere altamente resistenti all'abrasione; tali qualità non sono invece richieste per il confezionare uno strato di binder avente solo una funzione di collegamento.

Nonostante la carenza in letteratura di dati a disposizione riguardanti il fresato, si può affermare che con una buona approssimazione, la densità di volume del materiale frantumato, alla fine di tutti i trattamenti, è lievemente inferiore a quella degli aggregati vergini e si colloca tra 1940 e 2600 kg/m<sup>3</sup>; generalmente l'umidità naturale del materiale si aggira intorno al 5% ed un'eventuale esposizione alla pioggia può provocare un incremento di tali valori, raggiungendo il 7 e l'8%. Dal punto di vista del ripristino energetico la permanenza di RAP nelle riserve dovrà essere minima, il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione di pavimentazioni esistenti presenta un contenuto di legante tra 4.5 e 6% ed è piuttosto rigido a causa dell'ossidazione subita durante la stesa e la fase di esercizio. Estrahendo ed analizzando il bitume RAP, questo esibisce una bassa penetrazione ed un alto valore di viscosità che variano con la durata in servizio della pavimentazione originaria [B1; B2].

---

## **2.4. TECNICHE DI RICICLAGGIO DELLE PAVIMENTAZIONI**

### **STRADALI**

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

1. Riciclaggio in impianto fisso;
2. Riciclaggio in situ.

È 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; perciò, se ne guadagna anche in termini di efficienza.

Un'altra macro-distinzione che può esser fatta è tra:

1. Riciclaggio a caldo;
2. Riciclaggio a freddo.

In tale sperimentazione è stata adottata la tecnica di riciclaggio a freddo, per cui nel seguito verranno illustrate le principali caratteristiche di tale metodo, distinguendo tra riciclaggio in impianto e in situ.

L'attenzione è stata posta su tale tipologia di riciclaggio in quanto rispetto a quello a caldo garantisce importantissimi vantaggi, ovvero:

- 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, in quanto nel riciclaggio a caldo gli aggregati vanno scaldati a una temperatura maggiore di 110°C, mentre nel riciclaggio a freddo vengono utilizzati a temperatura ambiente, senza necessità di essere scaldati (a tal proposito va però valutata l'umidità del fresato per tenerne conto al momento dell'aggiunta dell'acqua);
- Riduzione dell'impiego di aggregati vergini consentendo di usufruire di una percentuale di conglomerato bituminoso di recupero molto più elevata; infatti, a

---

differenza del riciclaggio a caldo, nel quale è consentito un utilizzo di fresato che va dal 10% al 40%, con il riciclaggio a freddo esiste la possibilità di usufruire dell'80%-100% di conglomerato bituminoso riciclato

### **2.4.1. Riciclaggio a freddo in impianto fisso**

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a temperatura ambiente.

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, se necessario, la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero.

Negli impianti fissi, nati esplicitamente per questa tipologia di riciclaggio, i dosaggi del RAP, del bitume nuovo e degli aggregati, possono essere effettuati con maggior precisione, ed anche in base alle caratteristiche del fresato, possono essere variate le componenti della miscela; la produttività è di circa 100-150 tonn/ora [B3].

La scelta di riciclare a freddo, si effettua soprattutto quando si ha la necessità di utilizzare del materiale fresato, precedentemente accumulato in cantieri o depositi temporanei. La fresatura a caldo richiede infatti l'immediato reimpiego del conglomerato bituminoso recuperato che, con il raffreddamento, non sarebbe più lavorabile, e può essere quindi utilizzato solo nei processi di riciclaggio in sito; la fresatura a freddo, invece, fornisce un conglomerato di recupero che resta sciolto e lavorabile e può, quindi, essere riutilizzato sia nei processi di riciclaggio in sito sia in quelli in centrale. Un altro vantaggio del riciclaggio a freddo consiste nel non dover ricorrere ad energia termica nei processi di produzione: ciò comporta notevoli vantaggi dal punto di vista dell'economia, del consumo di energia e della salvaguardia dell'ambiente.

---

Per sfruttare al massimo i benefici della tecnica del riciclaggio, inoltre, è opportuno studiare bene il posizionamento dell'impianto, in quanto sono anche da ridurre al minimo gli spostamenti dei mezzi di trasporto del materiale.

Come nel caso degli impianti di riciclaggio a caldo, possiamo distinguerne due tipologie:

1. Impianto discontinuo, nel quale il materiale viene pesato e raggiunto il quantitativo prestabilito verrà inviato al ciclo produttivo;
2. Impianto continuo, nel quale l'alimentazione all'impianto avverrà in maniera continuativa.

Le differenze sostanziali stanno nella produzione oraria e nella precisione del dosaggio: per quanto riguarda la produzione oraria sarà sicuramente più alta in un impianto di tipo continuo, mentre la precisione del dosaggio è molto più accurata in un impianto di tipo discontinuo.

Il riciclaggio in impianto viene usato principalmente in caso di nuove costruzioni utilizzando il conglomerato bituminoso di recupero accumulato in precedenza, mediante operazioni di fresatura a freddo, o in caso di strade urbane che non permettono l'utilizzo delle apposite macchine stabilizzatrici.

#### **2.4.1.1. Composizione e funzionamento di un impianto fisso**

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- Un sistema di frantumazione e riselezionatura del fresato: in base alla curva granulometrica si stabilisce l'apporto di aggregati da integrare vergini per correggerla;
- Due o più predosatori per il fresato e per gli aggregati di integrazione;
- Un silos per il cemento;
- Un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa e/o bitume per schiumatura;
- Un serbatoio per l'acqua dotato di misuratore della portata;
- Rampa per l'emulsione;
- Attrezzature e strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire un costante controllo del processo;
- Un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro, o apparecchiatura di scarico del mescolatore.



*Figura 2.4.: Impianto per la produzione del conglomerato a freddo*

Dopo una preventiva frantumazione e riselezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini di apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono convogliati al mescolatore, per mezzo di nastri trasportatori; qui avviene la miscelazione, assieme al legante, che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in percentuali che vanno dal 3 al 6%, assieme all'acqua di aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler; i possibili additivi possono essere calcarei o silicei, ma indubbiamente il più utilizzato è il cemento, aggiunto in percentuali che vanno dall'1 al 3% [B3]; la sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche del conglomerato in termini di resistenza, e di essere un catalizzatore per favorire la rottura nel caso dell'emulsione. Di solito non è presente il silo di stoccaggio del prodotto finito, in quanto il conglomerato riciclato a freddo, viene direttamente scaricato sugli automezzi di trasporto. Bisogna inoltre porre molta attenzione alla preparazione del fresato, prima del suo ingresso nell'impianto, al fine di valutarne correttamente le pezzature, le impurità e l'umidità. Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo così la pavimentazione originaria.

### **2.4.2. Riciclaggio a freddo in situ**

La tecnica del riciclaggio, se sviluppata in sito, rappresenta 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 principali ritroviamo sicuramente:

- 
- ❖ Vantaggi ambientali, in quanto il materiale recuperato dalla pavimentazione preesistente, si aggira attorno al 100%, con conseguente azzeramento di aree destinate a discarica e minimo apporto possibile di materiali vergini. Sono limitate al massimo le aperture di nuove cave, favorendo la stessa salvaguardia ambientale. Le le emissioni nocive prodotte dal riscaldamento del bitume, sono quasi totalmente annullate, in quanto non vi sono operazioni di preriscaldamento della pavimentazione da fresare. Infine, vi è anche un notevole risparmio energetico, grazie alla riduzione delle operazioni di trasporto.
  - ❖ Buone prestazioni dello strato riciclato: le modalità di realizzazione ed il controllo delle varie fasi di miscelazione, nonché della stessa e della posa in opera del materiale riciclato, ne garantiscono prestazioni elevate.
  - ❖ Tempistiche di costruzione ridotte: i moderni treni di riciclaggio, hanno una produttività elevata, riducendo notevolmente i tempi di costruzione della pavimentazione rispetto a quelli tradizionali, e di conseguenza minimizzando tutti i fastidi che derivano dalla presenza di un cantiere, soprattutto in termini di circolazione.
  - ❖ Vantaggi logistici: grazie alla collocazione in una sola corsia stradale del treno di riciclaggio, le fasi esecutive risultano più agevoli e sicure.

Il riciclaggio a freddo viene realizzato in situ mediante l'utilizzo, anche in questo caso, di apposite apparecchiature (pulvimixer o riciclatrice), che permettono la miscelazione in continuo del fresato/materiale in sito, con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie (calce, cemento, e sostanze simili, considerando però che la più utilizzata è proprio il cemento), acqua e aggregati vergini di integrazione per la correzione del fuso granulometrico, in caso di necessità.

Le possibili miscele utilizzate sono rappresentate dalle seguenti combinazioni: emulsione e cemento, bitume schiumato e cemento, solo emulsione, solo bitume schiumato o solo cemento.

#### ***2.4.2.1. Composizione e funzionamento del riciclaggio in situ***

Inizialmente il riciclaggio in situ veniva realizzato con "treni ad unità multipla", una serie di macchinari che si differenziavano in base al tipo di intervento. Al giorno d'oggi si utilizzano le riciclatrici, apparecchiature che svolgono contemporaneamente il compito delle fresatrici e

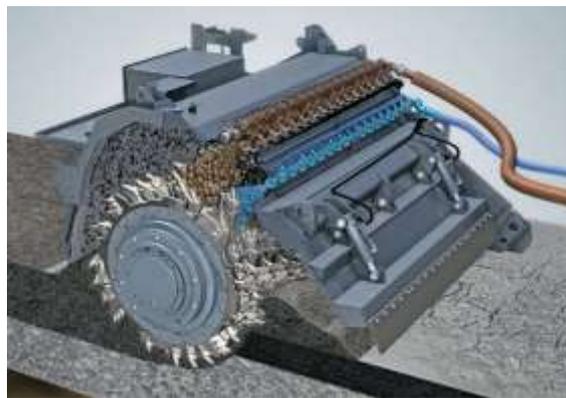
---

delle stabilizzatrici. Queste macchine, di notevoli dimensioni, sono montate su cingoli o su ruote gommatae.



*Figura 2.5.: riciclatrice*

La componente principale delle riciclatrici è il rotore di fresatura e miscelazione, composto da utensili da taglio per la frantumazione del conglomerato bituminoso. Per una maggiore produzione giornaliera si può optare per una demolizione prima con la fresatrice e successivamente una miscelazione con la riciclatrice. Il legante bituminoso (emulsione o bitume schiumato) e l'acqua sono iniettati nel vano di miscelazione. Gli aggregati di integrazione e il cemento vengono solitamente posizionati sulla pavimentazione stradale ammalorata antistante la riciclatrice.



*Figura 2.6.: Tamburo di fresatura*

---

## **CAPITOLO 3 – MATERIALI**

In questo capitolo si vogliono dapprima dare delle indicazioni generali sui materiali impiegati durante la produzione del conglomerato bituminoso riciclato, per poi passare ad esaminare nel dettaglio quelli utilizzati durante la sperimentazione oggetto di questa tesi.

In particolare, i materiali utilizzati durante la sperimentazione sono: RAP in tre diversi frazionamenti (fino, grosso e 16-20); filler di recupero; cemento; acqua; emulsioni bituminose (normale, modificata con polimeri SBS e con lattice di gomma).

### ***3.1. AGGREGATI LAPIDEI***

Gli aggregati sono i principali componenti di una miscela stradale. Essi non composti da granuli, che per definizione sono gli elementi solidi separabili senza esercitare un'azione di frantumazione.

Per natura gli aggregati possono essere di tre tipologie:

- ❖ Naturali, quindi derivanti dalla frantumazione di roccia compatta o da roccia sciolta;
- ❖ Artificiali, quindi prodotte industrialmente su misura, come loppa d'alto forno, ceneri volanti, argilla espansa, polistirolo ecc.;
- ❖ Riciclati, quindi i materiali utilizzati nel riciclaggio illustrati nel precedente capitolo (fresato compreso).

Per quanto riguarda la composizione chimica invece possiamo distinguere aggregati:

- ❖ Carbonatici, con una quantità di silice inferiore al 55%, le quali hanno un'affinità maggiore con il bitume in quanto basici.  
Gli aggregati carbonatici sono i più resistenti all'usura, per cui vengono usati per la realizzazione dei tappeti d'usura: in questo caso possono essere usati degli additivi che portano il bitume ad avere un comportamento da acido a basico;
- ❖ Silicei, con una quantità di silice superiore al 66%, i quali hanno una minore affinità con il bitume in quanto acidi.

Parlando di aggregati vergini naturali, una volta estratta la roccia da cava, trasportata e frantumata, per produrre diverse classi granulometriche si procede con la vagliatura, cioè

---

fatto passare su un vaglio, cioè delle reti inclinate vibranti sovrapposte, aventi diametro delle maglie decrescente andando da quella più in alto a quella più in basso. Se ad esempio avessimo tre livelli da 16mm, 8mm e 4mm, si possono ottenere quattro classi dimensionali ( $d/D$ , che sono rispettivamente il diametro più piccolo e più grande della classe granulometrica stessa):

1. Classe 0/4;
2. Classe 4/8;
3. Classe 8/16;
4. Classe maggiore di 16.



*Figura 3.1.: vagli vibranti inclinati*

Dal punto di vista dimensionale, gli aggregati sono distinti in:

- Grossi, con  $D \geq 4\text{mm}$  e  $d \geq 1\text{mm}$ ;
- Fini, con  $D \leq 4\text{mm}$  e  $d = 0$ ;
- Filler, cioè il passante al vaglio  $0,075\text{mm}$ ;
- Frazione unica, cioè non diviso per classi, ma gli aggregati vengono fatti passare su un unico vaglio.

Tale distinzione dimensionale è fondamentale, in quanto la grandezza del granulo condiziona sia il suo ruolo che ricopre nell'impasto, sia le proprietà che deve avere, nonché i processi a cui si deve sottoporre.

La principale proprietà che caratterizza una miscela di aggregati è la sua curva granulometrica, cioè la percentuale in peso degli elementi di ciascuna dimensione rispetto al peso totale. Dalla distribuzione granulometrica dipendono la lavorabilità, le proprietà volumetriche, il grado di compattezza, la risposta meccanica e la durabilità dello strato legato realizzato con tali aggregati.

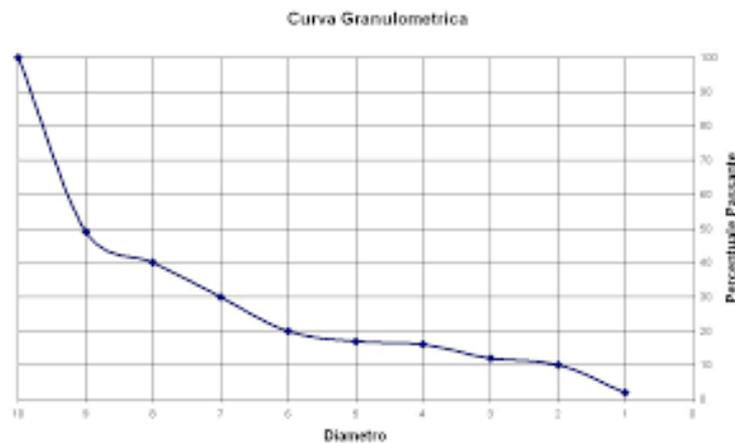


Figura 3.2.: esempio di curva granulometrica

Come si diceva nel precedente capitolo, potrebbe essere necessario correggere la curva granulometrica del fresato, in quanto i capitolati prescrivono che la curva granulometrica di progetto rientri in un certo fuso granulometrico, ovvero deve risultare che essa si ponga all'interno di due diverse curve granulometriche prefissate dai capitolati stessi.

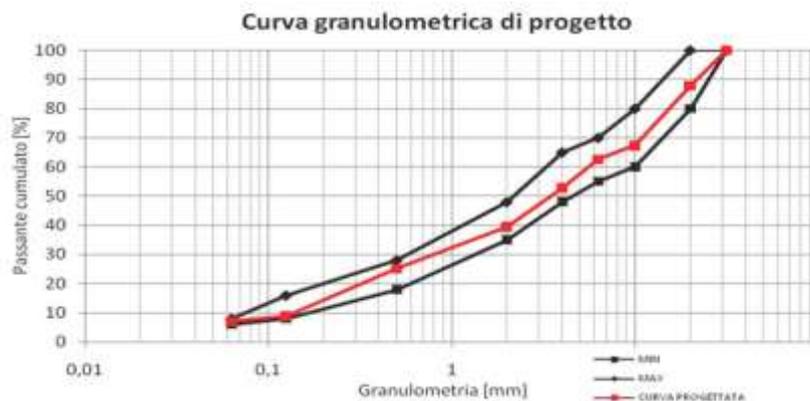


Figura 3.3.: Esempio di fuso granulometrico e curva di progetto

Quando la curva granulometrica di progetto non può essere ottenuta soltanto con il fresato è necessario correggerla integrando la miscela con aggregati vergini. Gli aggregati impiegati devono essere qualificati in conformità al Regolamento (UE) N. 305/2011 sui prodotti da costruzione e devono presentare la marcatura CE attestante la conformità all'appendice ZA della Norma Europea Armonizzata UNI EN 13043. Gli aggregati grossi e fini devono soddisfare i requisiti indicati nelle Tabella 3.1 e Tabella 3.2.

<b>AGGREGATO GROSSO</b>					
<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 <sub>30</sub>
Percentuale di particelle frantumate	UNI EN 933-5	C	%	100	C <sub>100.0</sub>
Dimensione Max	UNI EN 933-1	D	mm	31,5	-
Passante allo 0.063	UNI EN 933-1	f	%	≤1	f <sub>1</sub>
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	F	%	≤1	F <sub>1</sub>
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3	FI	%	≤30	FI <sub>30</sub>
Assorbimento d'acqua	UNI EN 1097-6	WA <sub>24</sub>	%	≤1,5	WA <sub>24</sub> 2

Tabella 3.1 - Requisiti aggregati grossi

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

Tabella 3.2 - Requisiti aggregati fini

Per quanto riguarda la miscela di progetto utilizzata per il confezionamento dei provini da sottoporre alle varie prove di laboratorio, si segnala che non sono stati utilizzati aggregati vergini al fine di raggiungere una curva granulometrica che rientri nel fuso di Bolzano, bensì esclusivamente rap e filler di recupero.

### **3.2. RAP**

Prima di iniziare occorre fare una precisazione sul fatto che i termini fresato e RAP vengono spesso usati come sinonimi, ma in realtà non è proprio corretto; infatti essi presentano delle differenze secondo quanto definito dalle Norme Tecniche d'Appalto Prestazionali: 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 [B2].

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 3.3) si è andati a miscelare i tre materiali insieme (considerando anche il filler) con lo scopo di ottenere una curva granulometrica contenuta all'interno del fuso riportato dai capitolati di Bolzano:

	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 3.3. - Analisi granulometrica RAP

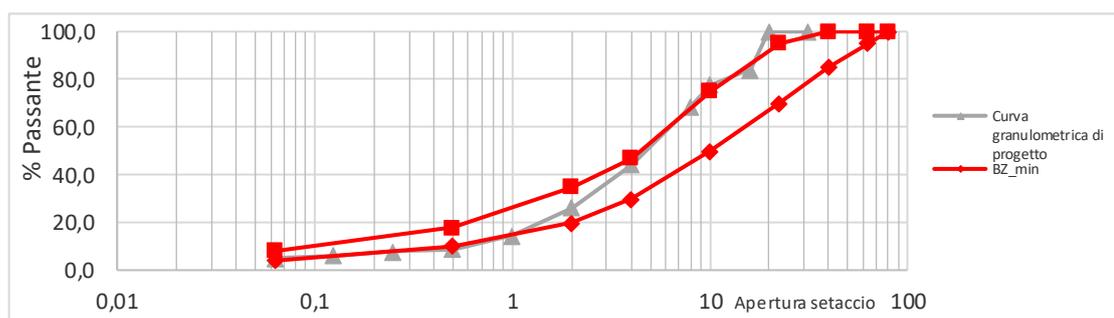


Figura 3.4.: Curva granulometrica del RAP



*Figura 3.5. - Campione di RAP fino*



*Figura 3.6.- Campione di RAP grosso*



*Figura 3.7.- Campione di RAP 16-20*

### **3.3. FILLER**

Il filler è caratterizzato da dimensioni finissime: secondo la norma CNR 139 si parla di filler per dimensioni inferiori di 0,075mm mentre per la normativa UNI EN 933-1 la dimensione massima è di 0,063mm.

In generale il filler può essere di due tipi:

- Di recupero, proveniente dai filtri dei fumi o dallo sgrossatore:
- Minerale, cioè quello vergine estratto dalla cava, ottenuto dalla frantumazione della roccia calcarea ed è solitamente rappresentato dal carbonato di calcio.

Le analisi sperimentali condotte con lo scopo di studiare le prestazioni meccaniche dei conglomerati bituminosi riciclati a freddo al variare della quantità di filler hanno 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.

Ai fini di tale sperimentazione, è stato utilizzato un filler di recupero calcareo derivante dalla pulizia dei filtri che raccolgono i fumi in uscita dal cilindro di miscelazione del conglomerato dell'impianto Sintexcal S.P.A. sito nel comune di Falconara Marittima; la sua funzione è quella di integrare la curva granulometrica e conferire una certa plasticità al conglomerato bituminoso. 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.

Lo studio preliminare della miscela è stato effettuato considerando i risultati ottenuti per il filler riportati nella seguente *Tabella 3.4*, utilizzati per la determinazione della curva granulometrica precedentemente vista (*Figura 3.4*):

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 3.4 - Analisi granulometrica filler di recupero*

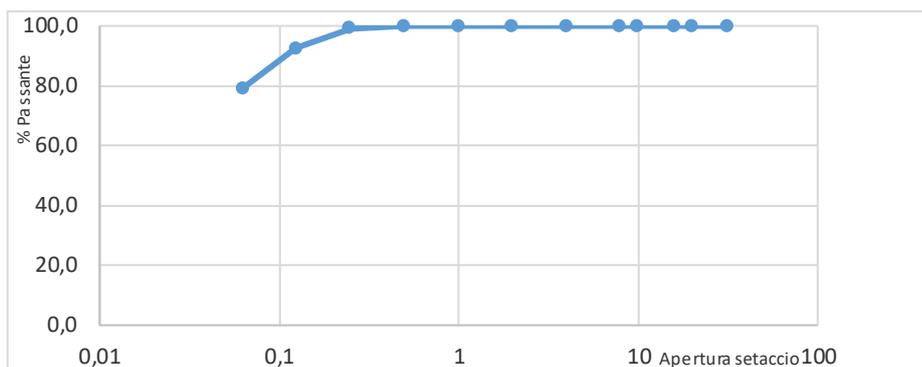


Figura 3.8- Curva granulometrica filler di recupero



Figura 3.9- Filler di recupero

### **3.4. LEGANTI BITUMINOSI**

Con legante bituminoso si intende un composto di natura organica derivato dal petrolio in grado di conferire adesione agli aggregati, senza reagire con essi. Si elencano di seguito i vari utilizzi dei leganti bituminosi. Tra le tipologie di legante impiegati nel campo del riciclaggio a freddo si ha:

- Emulsione bituminosa, utilizzata nella presente tesi;
- Bitume schiumato, il quale non è stato impiegato in questa sperimentazione e quindi verrà trattato solo marginalmente.

#### **3.4.1. Emulsione bituminosa**

Un'emulsione bituminosa è caratterizzata dalla dispersione di legante bituminoso in acqua ed essendo quindi originate dall'unione di due liquidi immiscibili, avremo:

1. Fase disperdente, cioè acqua;

- 
2. Fase dispersa, cioè bitume (tradizionale o modificato) sotto forma di goccioline;
  3. Agenti emulsionanti, chiamati anche tensioattivi, utilizzati in quantità inferiori al 3% che favoriscono la dispersione, evitando la flocculazione del bitume.

La classificazione delle emulsioni bituminose viene fatta in base a:

1. Grado di acidità, dividendole in anioniche (basiche) e cationiche (acide). Quest'ultime sono le uniche previste nell'utilizzo di emulsioni, in quanto più stabili;
2. Contenuto di residuo bituminoso, cioè la percentuale di bitume impiegato (50%, 55%, 60%, 65%, 69%). La quantità di bitume è sempre maggiore o al più uguale alla quantità di acqua, in quanto è il bitume che esercita il potere legante, mentre l'acqua è solo il mezzo per ottenere un legante liquido a temperatura ambiente;
3. Capacità di impastare i leganti idraulici, i quali si combinano con le emulsioni nel caso in cui esse siano sovrastabilizzate;
4. Velocità di rottura, cioè la velocità con la quale il bitume si separa dalla fase acquosa per formare una sottile pellicola, in modo da fungere da legante.

La rottura dell'emulsione a seguito del contatto con l'aggregato o con un altro componente (come ad esempio il fresato), si sviluppa in più fasi:

- 4.1. Sedimentazione delle particelle di bitume;
- 4.2. Flocculazione delle particelle di bitume sulla superficie degli aggregati;
- 4.3. Coagulazione, cioè la fusione delle goccioline di bitume flocculate, formando un'unica fase continua con potere legante;
- 4.4. Presa, durante la quale l'acqua formante l'emulsione si allontana, realizzandosi così la completa adesione del legante sulla superficie di contatto: questo vuol dire che durante il fenomeno l'acqua non evapora, bensì defluisce.

La velocità di rottura dipende dal clima (maggiore è l'umidità o minore è la temperatura, minore sarà la velocità di rottura), dalla temperatura dell'emulsione e dalla natura degli aggregati (minore è la loro superficie specifica e maggiore sarà la velocità di rottura, favorita anche se gli aggregati risultano sporchi).

Per capire come venga denominata (tramite nomenclatura CEN) un'emulsione è bene fare un esempio: EMULSIONE C 65 BP F 2:

- 
- C: cationica (altrimenti A: anionica);
  - 65: percentuale di residuo bituminoso;
  - B: bitume;
  - P: presenza di lattice, quindi emulsione modificata;
  - F: presenza di flussante maggiore del 3%;
  - 2: classe di velocità di rottura

Per quanto riguarda la classe di velocità di rottura abbiamo classi che vanno da 2 a 6 (la velocità decresce all'aumentare del numero d'ordine). Abbiamo anche classi 9 o 10 se sono sovrastabilizzate; in particolare la classe 9 non è stabile (si rompe) a contatto con il cemento, mentre la 10 è stabile.

In base alla velocità di rottura si distinguono cinque categorie diverse di emulsioni:

1. Rottura super rapida (RR)
2. Rottura rapida (ER)
3. Rottura media (EM)
4. Rottura lenta (EL)
5. Rottura sovrastabilizzata (LL)

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 [B2].

Per il riciclaggio a freddo è necessaria un'emulsione cationica a rottura lenta con il 60% di bitume residuo che soddisfi le specifiche presenti nella tabella 3.5.

<b>EMULSIONE DI BITUME MODIFICATO C60BP10</b>					
<i>Requisito</i>	<i>Norma</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori richiesti</i>	<i>Classe</i>
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 EN 1426	-	0,1 mm	50-70	3
Punto di rammollimento	UNI EN 1427	-	°C	> 60	2
Punto di rottura (Frass)	UNI EN 12593	-	°C	< -13	-
Ritorno elastico a 25 °C	UNI EN 13398	R <sub>E</sub>	%	≥ 50	5

Tabella 3.5 - Requisiti emulsioni bituminose modificate

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 di gomma.



Figura 3.10-Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

### **3.4.1.1. Emulsione normale – Rigeval MC (N)**

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.

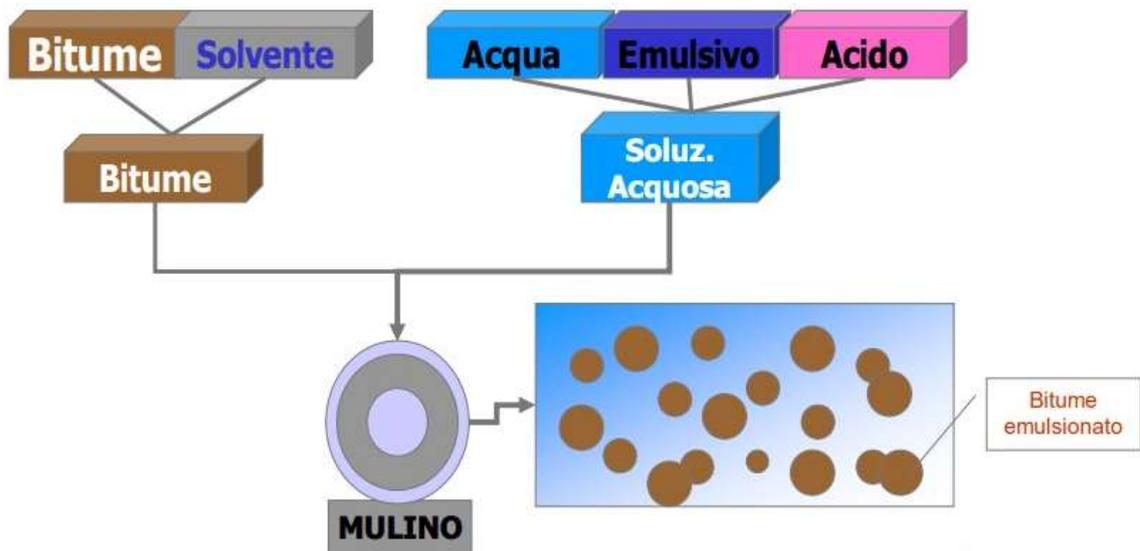


Figura 3.11 - Schema produttivo emulsioni di bitume distillato

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:

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

Caratteristiche dell'emulsione	Metodo	U.d.M.	Prestazione		Classe
			min	max	
<b>Contenuto di legante</b>	UNI EN 1428	%	<b>58</b>	<b>62</b>	6
<b>Stabilità alla miscelazione con il cemento</b>	UNI EN 12848	%		<b>2</b>	10
<b>Viscosità a 40°C</b> (tempo di efflusso tazza 2 mm)	UNI EN 12846	sec	<b>15</b>	<b>70</b>	3
<b>Adesività</b>	UNI EN 13614	%	<b>90</b>		3

Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074)					
<b>Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio</b> Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		<b>100</b>	3
<b>Consistenza alle temperature elevate di esercizio</b> Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	<b>43</b>		6

Figura 3.12 - Scheda tecnica emulsione normale RIGEVAL MC

### **3.4.1.2. Emulsione modificata con polimeri SBS – Rigeval** **CM (P)**

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 e 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.

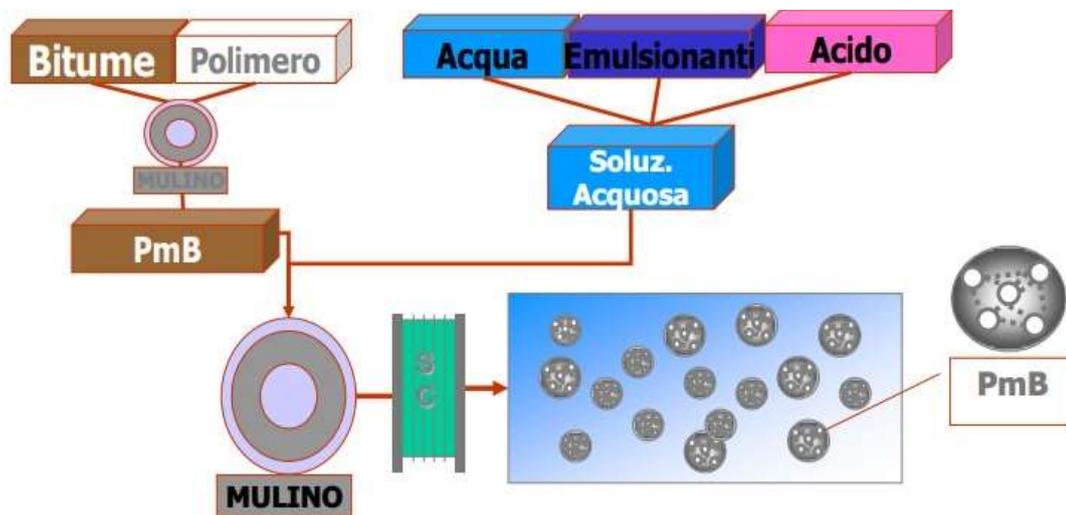


Figura 3.13 - Schema produttivo emulsioni di bitume modificato

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 RIGEVAL CM prodotta dalla ditta Valli Zabban. Di seguito viene presentata la scheda tecnica:

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

Figura 3.14 - Scheda tecnica emulsione modificata RIGEVAL CM

### 3.4.1.3. Emulsione modificata con lattice – Rigeval LX (L)

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.

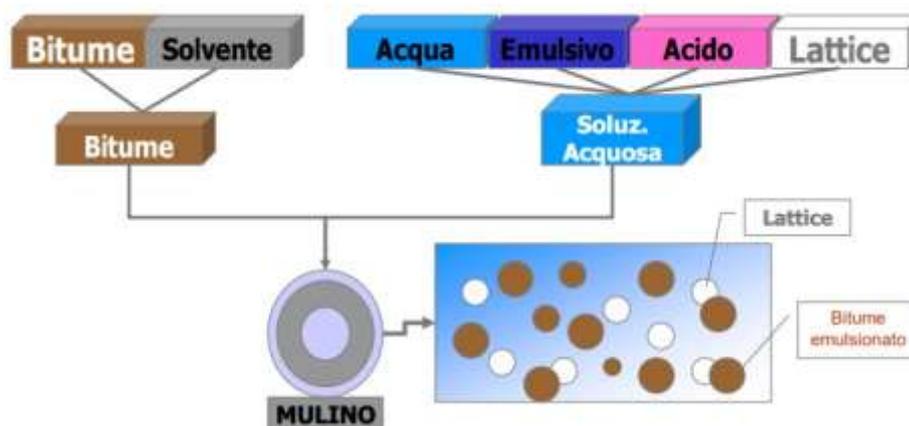


Figura 3.15 - Emulsioni utilizzate durante la sperimentazione

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 RIGIVAL LX prodotta dalla ditta Valli Zabban. Di seguito viene presentata la scheda tecnica:

<b>Sito produttivo</b>	Stabilimento di Bologna Stabilimento di Perugia	Via del Tragheto, 42 – 40100 Bologna Via della Valtiera, 101 – 06135 Colchester
<b>Designazione</b>	<b>C60BP10</b>	
<b>Descrizione del prodotto</b>	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		5
Contenuto di acqua	UNI EN 1428	%		40	5
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)					
<b>Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio</b>					
Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dnm	50	70	3
<b>Consistenza alle temperature elevate di esercizio</b>					
Punto di rammolimento P.A.	UNI EN 1427	°C	55		2
<b>Fragilità alle basse temperature</b>					
Punto di rottura Fraass	UNI EN 12593	°C	-10		5
<b>Recupero di deformazione</b>					
Ritorno elastico a 25°C	UNI EN 13308	%	55		5

Figura 3.16: scheda tecnica emulsione modificata con lattice di gomma RIGIVAL LX

### **3.4.2. Bitume schiumato**

È un particolare stato fisico del bitume, caratterizzato da un'elevata superficie specifica e da una ridotta viscosità, che permette di produrre miscele per pavimentazioni utilizzando anche aggregati a temperatura ambiente ed umidi. La schiumatura del bitume si ottiene spruzzando acqua sul bitume ancora molto caldo: quando l'acqua (2%-3% in peso) entra in contatto con il bitume caldo (160°C-180°C) diventa vapore acqueo, formando così delle bolle ricoperte con un film di bitume, ottenendo un volume fino a venti volte maggiore; successivamente la schiuma si dissolve in tempi rapidissimi dell'ordine del minuto ed il bitume ritorna allo stato originale.

Con questa tecnica, durante la miscelazione le bolle, a contatto con gli aggregati, esplodono; in tal modo i frammenti di bitume si disperdono inglobando gli aggregati, creando così una sorta di malta bituminosa che lega gli aggregati stessi.

Ad oggi vengono utilizzate delle macchine miscelatrici che producono bitume schiumato, che viene direttamente miscelato in situ con gli aggregati.

---

I parametri fondamentali che contraddistinguono i bitumi schiumati sono due:

1. Rapporto di espansione, che misura la capacità del bitume di produrre schiuma, espresso come rapporto tra il volume dopo e prima la schiumatura (tale rapporto è maggiore di uno);
2. Tempo di semitrasformazione, che misura il tempo di disfacimento delle bolle, in particolare quello che intercorre tra il massimo volume raggiunto con la schiumatura e la metà dello stesso.

Questi due parametri sono influenzati da tre fattori:

1. Temperatura del bitume: maggiore è la temperatura del bitume aumentano entrambi i parametri, con il vantaggio di avere più tempo a disposizione per la miscelazione;
2. Quantitativo di acqua: aumentando la quantità di acqua aumenta il rapporto di espansione, ma ogni singola bolla ha uno spessore minore, che quindi si dissolverà prima, diminuendo il tempo di semitrasformazione;
3. Viscosità: se la viscosità del bitume è alta, saranno elevati entrambi i parametri, relativamente ad un bitume meno viscoso.

È fondamentale però precisare che se si ha a disposizione l'emulsione bituminosa non ha senso ricorrere alla tecnica del bitume schiumato.

### **3.5. ACQUA**

L'acqua è un elemento che svolge un ruolo fondamentale nel confezionamento delle miscele riciclate a freddo.

L'importanza di questa componente è data da due differenti motivazioni:

- 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;
- 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.

---

L'acqua impiegata dovrà perciò essere esente da impurità sia in sospensione che in soluzione perché le impurità potrebbero influire negativamente sui processi necessari per la maturazione della miscela e possono anche alterarne le proprietà.

È fondamentale precisare che l'acqua della miscela deriva da diverse fonti:

- 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.

Nella presente sperimentazione si è impiegato il 5% di acqua sul peso sugli aggregati; inoltre, essa risulta conforme alla norma UNI EN 1008.

### **3.6. CEMENTO**

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 3.17 - 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 [B2].

---

Nella presente sperimentazione si è impiegato il 2% di cemento in peso sugli inerti. Le fasi del processo sono il risultato di un insieme di reazioni chimiche tra i costituenti del cemento e l'acqua d'impasto:

- Idratazione: ha inizio subito dopo la miscelazione con acqua ed ha una durata di qualche decina di minuti;
- Presa: si sviluppa in seguito alla formazione di ettringite e dura qualche ora;
- Indurimento: inizia poco prima di 24 ore in seguito allo sviluppo fibroso del prodotto idratato.

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

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. In particolare [B2]:

- 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.

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.

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 [B2].

### **3.7. REQUISITI DI CAPITOLATO DEI MATERIALI**

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.

#### **3.7.1. 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.

#### **3.7.2. Aggregati di integrazione**

Quando la curva granulometrica di progetto non può essere ottenuta soltanto con il fresato è necessario correggerla integrando la miscela con aggregati vergini.

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.

Gli aggregati grossi e fini devono soddisfare i requisiti indicati nelle due tabelle seguenti.

<b>AGGREGATO GROSSO</b>					
<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 <sub>30</sub>
Percentuale di particelle frantumate	UNI EN 933-5	C	%	100	C <sub>1000</sub>
Dimensione Max	UNI EN 933-1	D	mm	31,5	-
Passante allo 0.063	UNI EN 933-1	f	%	≤1	f <sub>1</sub>
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	F	%	≤1	F <sub>1</sub>
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3	FI	%	≤30	FI <sub>30</sub>
Assorbimento d'acqua	UNI EN 1097-6	WA <sub>24</sub>	%	≤1,5	WA <sub>24</sub> 2

Tabella 3.6 - Requisiti aggregati grossi

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

Tabella 3.7 - Requisiti aggregati fini

### **3.7.3. Leganti: bitume**

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*.

<b>EMULSIONE DI BITUME MODIFICATO C60BP10</b>					
<i>Requisito</i>	<i>Norma</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori richiesti</i>	<i>Classe</i>
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 <sub>E</sub>	%	≥ 50	5

Tabella 3.8 - Requisiti emulsioni bituminose modificate

### **3.7.4. Leganti: cemento**

Il cemento 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.

---

### **3.7.5. 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.

### **3.7.6. 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 3.9.: Fuso granulometrico di riferimento per la miscela di aggregati

### **3.7.7. 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 seguente tabella:

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

Tabella 3.10 - 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 seguente tabella.

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 3.11 - 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 girettoria che costituisce il riferimento per il controllo della densità in sito [B2].

---

# **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 restituivano le migliori prestazioni.

## **4.2. APPARECCHIATURE E PROTOCOLLI DI PROVA**

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

Verrà inoltre illustrata la logica adottata in sede di denominazione dei provini.

### **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. Si tratta di una procedura che prevede la vagliatura del materiale tramite una serie di setacci, che possono essere a maglia circolare o quadrata. 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 modo tale che i granuli di diverse dimensioni verranno bloccati al rispettivo setaccio. 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 vaglio vibrante che, generando un'oscillazione orizzontale per dieci 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 4.1 - Pila di setacci posizionata nel vibro-vaglio*

Noto 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			
	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, preso dalla quinta ripetizione del fresato grosso utilizzato nella sperimentazione

## **4.2.2. Determinazione della miscela di progetto**

### **4.2.2.1. Miscele di progetto degli aggregati**

La curva granulometrica di progetto (uguale per tutte e tre le emulsioni impiegate nella sperimentazione) 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 nella tabella 3.9.

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 granulometricamente corretti attraverso:

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

In questo modo è stato possibile ottenere la seguente curva (rientrante nel fuso del capitolato di Bolzano):

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

Tabella 4.3 - Granulometrie relative alle componenti della miscela di progetto

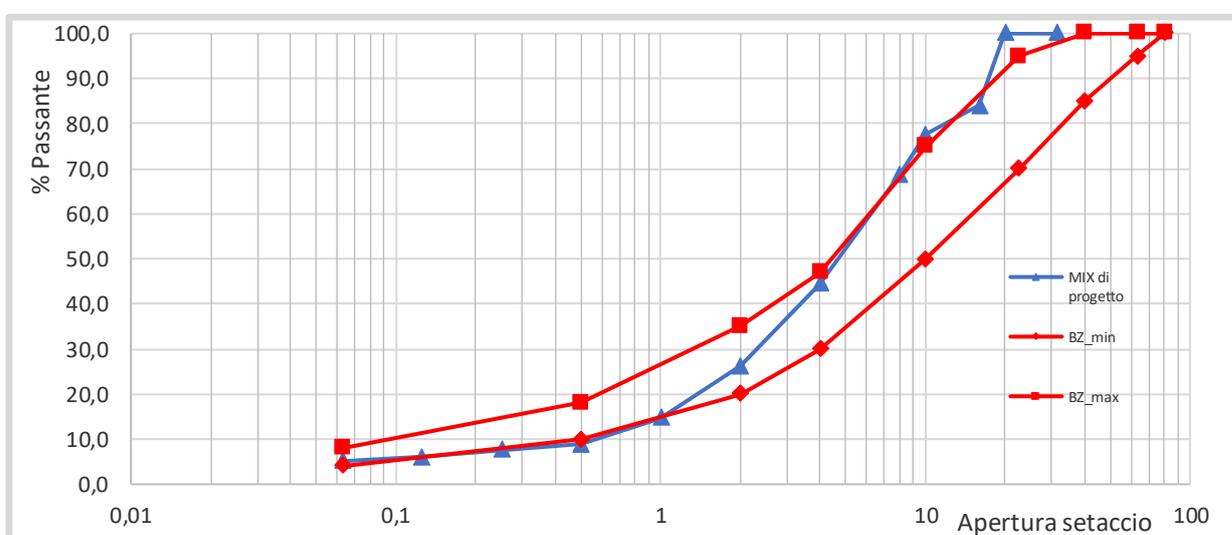


Figura 4.2 - Curva granulometrica miscela di progetto

---

### **4.2.2.2. 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.

Ora, prima di vedere la metodologia che ha portato al confezionamento dei vari provini, si farà chiarezza (paragrafo 4.2.1.3.) sulla logica della denominazione dei vari provini, distinguendo tra quelli realizzati per le prove di modulo di rigidità e a rottura a trazione indiretta, da quelli destinati alla prova a fatica.

### **4.2.3. Denominazione dei provini**

#### **4.2.3.1. Denominazione dei provini per “prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)” e “prova a rottura a trazione indiretta (ITS)**

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 giratoria, di sei provini con diametro di 150 mm e altezza post-compattazione compresa tra 71-74 mm per un totale di 24 provini per ciascuna famiglia.



Figura 4.3. – Provini

#### **4.2.3.2. Denominazione dei provini per “prova a fatica”**

Mentre le “prove di modulo a trazione indiretta” e “la prova a rottura a trazione indiretta” sono state effettuate su provini cilindrici aventi diametro di 150mm ed un’altezza post compattazione di 71mm-74mm, la “prova a fatica” è stata effettuata sempre su provini cilindrici di diametro pari a 150mm, ma aventi un’altezza post compattazione di 170mm.

In questo caso, per ogni famiglia sono stati confezionati 20 provini, tramite pressa a taglio giratoria.

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

- Lettera da A a Z per indicare cronologicamente l’impasto;
- Lettera N, P o L per indicare la famiglia, quindi il tipo di emulsione;
- Simbolo \_;
- Numero romano crescente da I a C in ordine di realizzazione del provino.

---

Quindi ad esempio il nome FL\_XIX indica un provino realizzato durante il sesto impasto (lettera F) della miscela con emulsione bituminosa modificata con lattice (lettera L) ed è il diciannovesimo (XIX) provino realizzato per la famiglia L.



*Figura 4.4. - Esempio provino*

Dei 20 provini realizzati, 10 verranno testati dopo 9 mesi/1 anno mentre i restanti 10 vengono carotati (dopo 20gg di maturazione) con la macchina carotatrice, e successivamente tagliati. Dopo 30 giorni di maturazione a 40°C, vengono quindi testati a fatica.



*Figura 4.5. - Macchina carotatrice*



Figura 4.6. - Provini carotati

Inoltre, da ogni provino è stato possibile ricavare due provini, nominati rispettivamente *sup* e *inf*, per la prova di fatica.



Figura 4.7. - Provino carotato e tagliato per la prova di modulo complesso a compressione



*Figura 4.8. - Provino carotato e tagliato per ottenere due provini per prova di fatica*

Come nel caso precedente, nel quale non tutti i provini sono stati sottoposti alla “prova di modulo a trazione indiretta” e “prove di rottura a trazione indiretta”, anche per la “prova a fatica” non tutti i provini sono stati oggetto della stessa.

In particolare, la “prova a fatica” ha riguardato i seguenti provini:

- AN\_I (sup ed inf); AN\_2(sup ed inf); AN\_3(sup ed inf); AN\_IV(sup ed inf); DN\_XI(sup ed inf); DN\_XII(sup ed inf); DN\_XIV(sup ed inf);
- AP\_I (sup ed inf); AP\_II (sup ed inf); AP\_III (sup ed inf); AP\_IV (sup ed inf); EP\_XV (sup ed inf); EP\_XVI (sup ed inf); EP\_XVII (sup ed inf);
- AL\_IV (sup e inf); BL\_V(sup e inf); BL\_VI(sup e inf); BL\_VII(sup e inf); DL\_XI(sup e inf); DL\_XII(sup e inf); DL\_XIII(sup e inf).

#### 4.2.4. 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 4.9 - 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 4.4. - 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 l'evaporazione dell'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, all'interno del miscelatore meccanico.



*Figura 4.10 - Secchio di plastica sigillato*

La miscelazione prevede il rispetto dei seguenti passaggi:

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



*Figura 4.11 - Aggregati nel miscelatore*

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



*Figura 4.12 - Aggregati e filler nel miscelatore*

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



*Figura 4.13.- 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 4.14 - Aggiunta di acqua*

6. Si inserisce la quantità richiesta di emulsione bituminosa e si miscela per 1 minuto;



*Figura 4.15- Aggiunta dell'emulsione bituminosa nel miscelatore*

---

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



Figura 4.16 - Aggiunta della seconda metà di acqua nel miscelatore

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



Figura 4.17 - Posizionamento impasto nel cassone

#### **4.2.5. 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.

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 4.18 - Pressa a taglio giratoria

Di seguito si riportano le varie interfacce del software della pressa giratoria:



Figura 4.19 - Schermata iniziale del software



Figura 4.20 - Schermata principale pressa a taglio giratoria

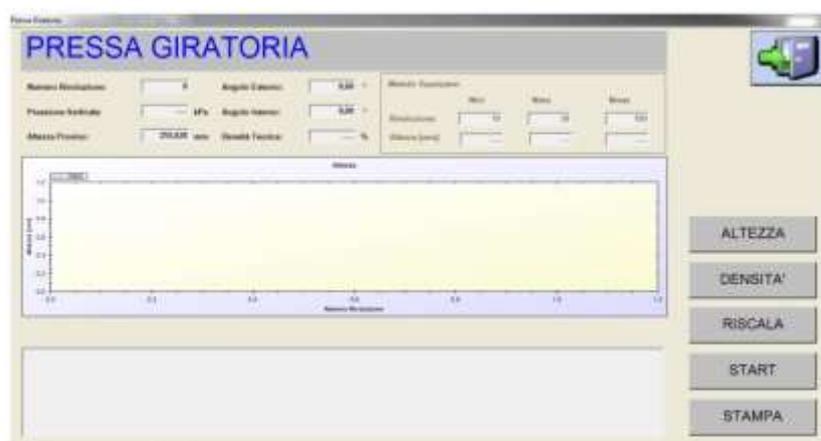


Figura 4.21 - Schermata di avvio prova

Di seguito vengono elencate le condizioni di prova per la compattazione dei provini e fornite in input al computer per i provini destinati alle prove di modulo e di rottura a trazione indiretta.

- Pressione verticale: 600 kPa
- Diametro provino: 150 mm
- Angolo di inclinazione della fustella: 1,25°
- N° giri: 100

Per quanto riguarda il confezionamento dei provini destinati alla prova a fatica invece, i parametri in termini di pressione verticale e diametro rimangono invariati, mentre cambia il numero di giri previsti sotto la pressa giratoria, impostati in un numero pari a 120.



*Figura 4.22 - 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 una quantità pari a 2841 g (per i provini che verranno testati a modulo e a rottura a trazione indiretta) o a 6571g (per i provini testati a fatica).



*Figura 4.23 - 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 4.24 - Lubrificazione del piano di appoggio*

---

Eseguita questa fase la fustella può essere inserita nella macchina.



*Figura 4.25 - 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 giri il pistone sale ed è possibile estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.



*Figura 4.26 - Prova in 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 4.27 - Estrazione del provino

Durante la procedura 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:  $m_4$

#### **4.2.6. 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 4.28 - 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 rappresentazione:

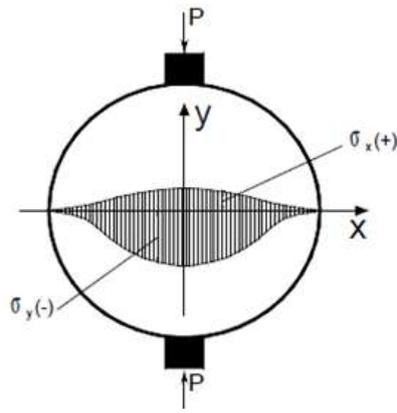


Figura 4.29 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

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

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

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

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  $\epsilon_x$  dell'elemento è:

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

Dalle espressioni ricavate in precedenza, e considerando che  $\Delta$ , 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:

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

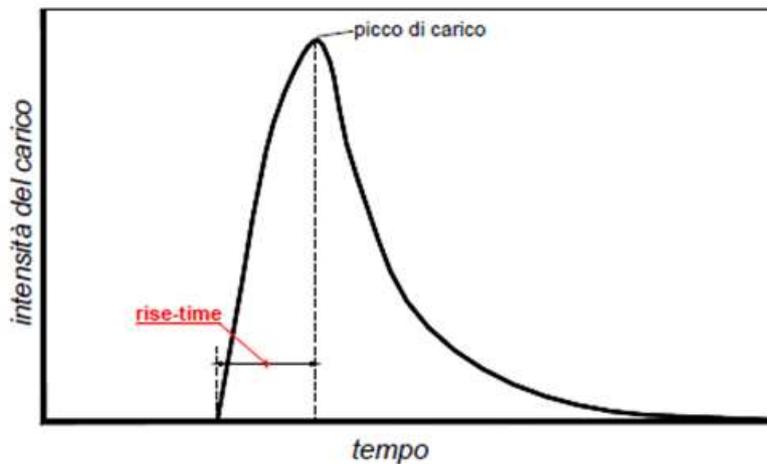


Figura 4.30 - Rappresentazione del rise-time di un carico di impulso

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 rigidità corretto viene perciò calcolato con tale formula:

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

con:

- $E'$ : modulo di rigidità aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- $k$ : rapporto tra le aree;
- $E$ : modulo di rigidità 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 rigidità. 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, chiamato *castelletto*, usato per posizionare il provino.

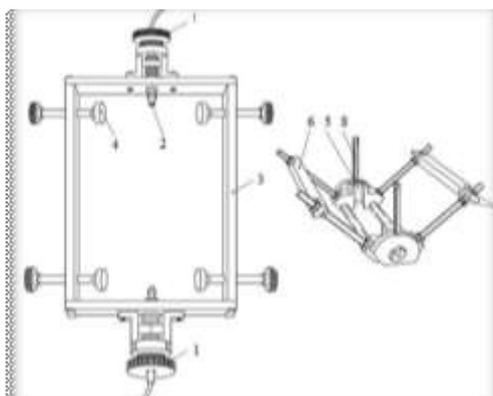


Figura 4.31 - Componenti del castelletto

Il provino viene posizionato inizialmente su questo *castelletto* (Figura 4.31); 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). Si applica poi la testa di carico e l'elemento è pronto per essere messo nella camera climatica.



Figura 4.32 - Provino montato sul castelletto e testa di carico applicata



*Figura 4.33 - 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 4.34 - 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.

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 [ $\mu\text{m}$ ]: deformazione orizzontale che la macchina deve far raggiungere al provino (nella sperimentazione si impone una deformazione orizzontale di 2  $\mu\text{m}$ );
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 4.35 - Schermata iniziale del software ITSM con dati input

Cliccando sul tasto Continue si aprirà una nuova schermata rappresentata nella *Figura 4.36* dove vanno inseriti i dati di prova, colui che la esegue, il metodo di produzione della prova, ecc.

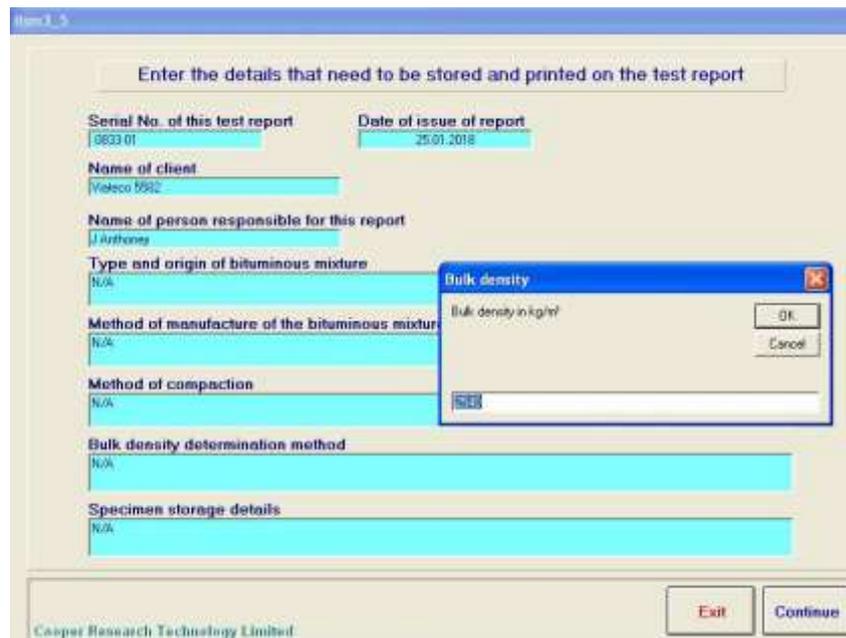


Figura 4.36 - Seconda schermata

Successivamente, premendo sempre sul tasto Continue, si andrà ad ottenere una nuova pagina che è quella di *Figura 4.37*. 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.

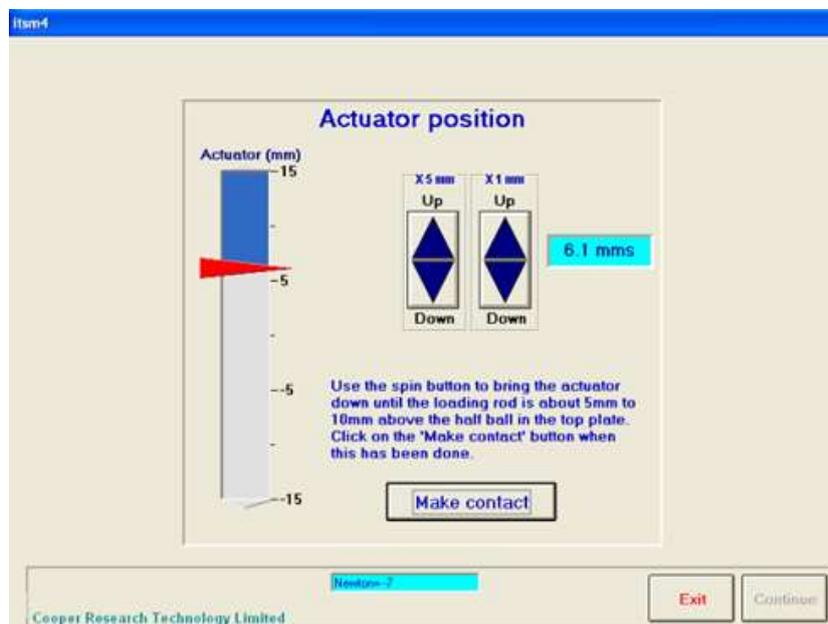


Figura 4.37 - Schermata con il comando "Make contact"

Raggiunto il contatto tra i due elementi si genera l'apertura automatica della schermata di *Figura 4.38*, utile al controllo dei trasduttori che verranno regolati agendo sulle due rotelle finché le frecce non diventano rosse come in *Figura 4.39*, indicando 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.

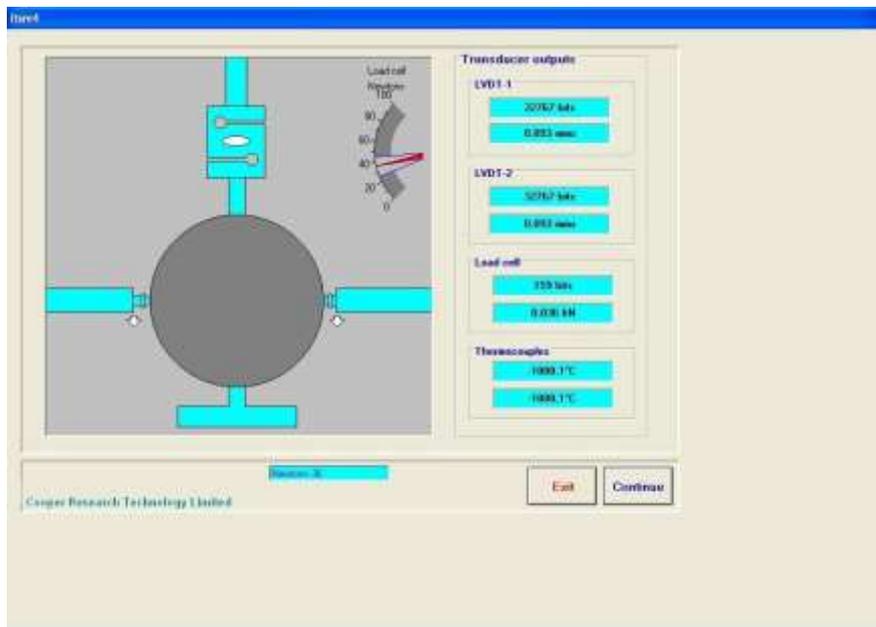


Figura 4.38 - Schermata prima della regolazione dei trasduttori

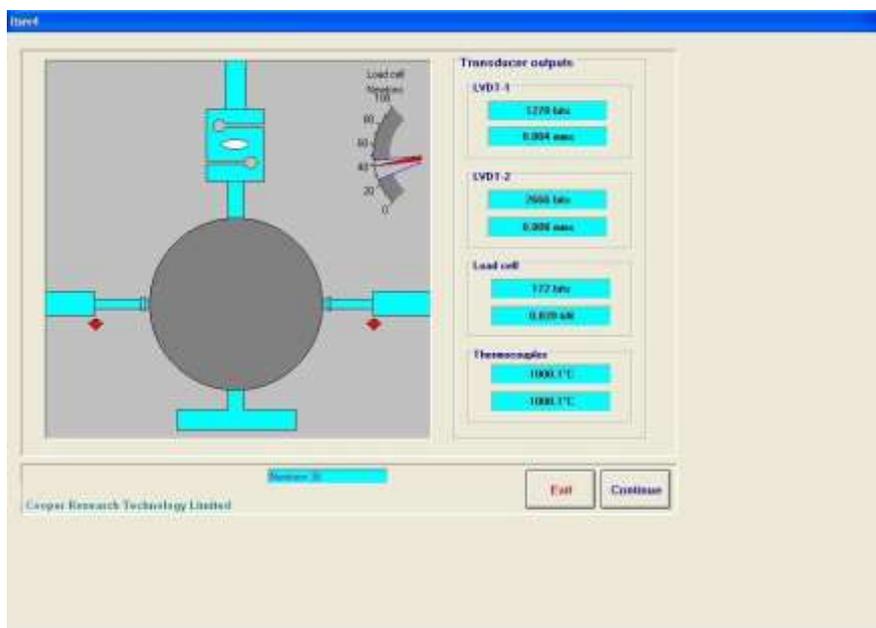


Figura 4.39 - Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

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 4.40* dove si applicano 5 impulsi di pre-carico e si visualizzato i relativi dati.

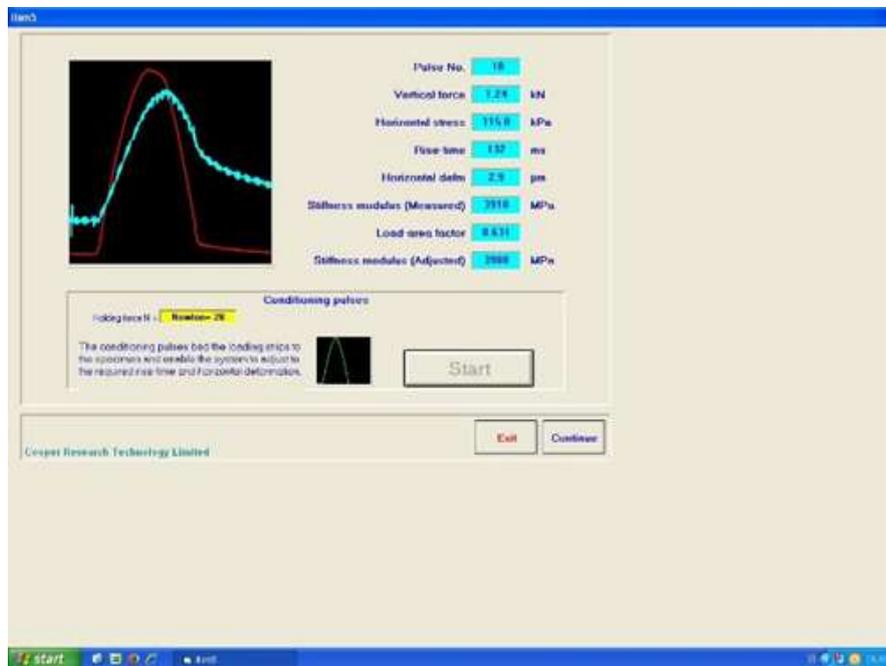


Figura 4.40 - Schermata degli impulsi pre-carico

Dopodiché cliccando nuovamente su Continue si arriva alla schermata finale, *Figura 4.41*, dove vengono riportati i parametri precedentemente descritti per ciascuno dei 5 impulsi di prova applicati con il relativo valore medio.



Figura 4.41 - 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  $90^\circ$  (con una tolleranza di  $10^\circ$ ) 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 viene svolta 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  $5^\circ\text{C}$  ed i  $25^\circ\text{C}$ . In questa indagine i provini sono stati pre-condizionati in camera climatica a  $25^\circ\text{C}$  per 4 ore.



*Figura 4.42 - Camera climatica a  $25^\circ\text{C}$*

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  $15 \pm 2$  mm, spessore  $4 \pm 1$  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 4.43 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa*

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



*Figura 4.44 - 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-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.

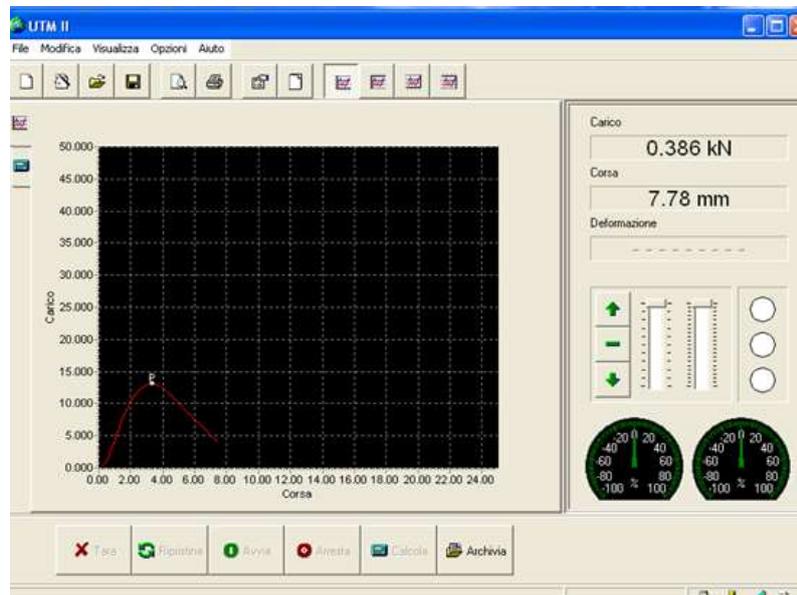


Figura 4.45 - Curva sforzo-deformazione risultante dell'applicazione del carico assiale

In tal modo il software andrà ad elaborare il corrispettivo valore di resistenza a trazione ITS:

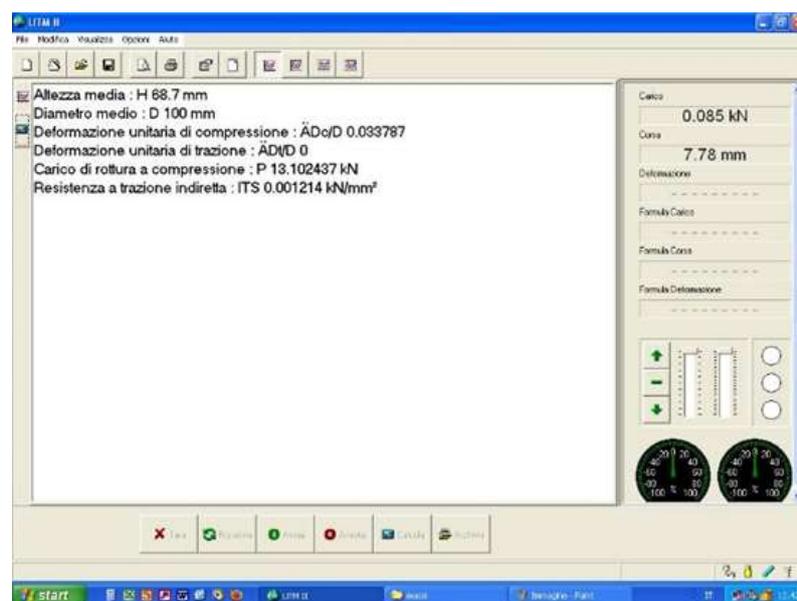


Figura 4.46 - Schermata con rielaborazione dei risultati

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 4.47 - Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

#### **4.2.8. Prova a fatica (UNI EN 12697-24)**

La prova a fatica viene effettuata su provini cilindrici tramite il Nottingham Asphalt Tester (NAT), previo condizionamento per (almeno) 4 ore in camera termostatica alla temperatura di 20 °C.

La prova consiste nell'applicazione di un carico ciclico molto inferiore rispetto alla resistenza del materiale, ma ripetuto per un numero di volte così elevato da portarlo a rottura. Ogni prova effettuata, restituisce un punto all'interno del grafico, in scala bilogaritmica, che riporta il numero di cicli sulle ascisse e la deformazione iniziale  $\varepsilon_0$  sulle ordinate.

Per ottenere una retta nel grafico è opportuno realizzare almeno tre prove con livelli deformativi diversi (basso, medio ed alto), per poi interpolarli al fine di ottenere la legge di fatica.

Per stimare la corretta tensione orizzontale, i provini vengono sottoposti ad una prova ITSM che misura la rigidità: maggiore è il modulo, maggiore è il valore di tensione orizzontale applicabile. Il software ITFT, dopo 115 cicli di carico, restituisce il valore della deformazione iniziale  $\varepsilon_0$ , utile a definire il punto per costruire la curva di fatica.

---

La norma poi indica di effettuare una replica per ogni misurazione effettuata ad un certo livello deformativo.

In questo modo quindi si ottiene la retta o legge di fatica del materiale, che permetterà di confrontare il comportamento di materiali diversi, come nel caso del presente lavoro sperimentale, oppure di progettare la pavimentazione stradale.



Figura 4.48. - Legge di fatica del materiale

Come già affermato precedentemente, l'apparecchiatura utilizzata è il NAT ma in una diversa configurazione di prova. Infatti, il castelletto e la disposizione dei trasduttori saranno diversi.

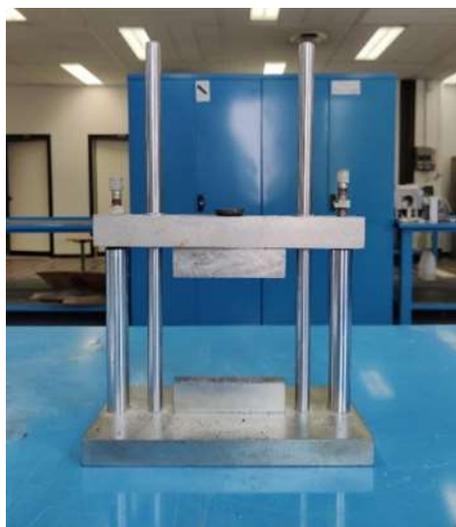


Figura 4.49 - Castelletto per prova di fatica



*Figura 4.50 - NAT in configurazione prova a fatica*

In questo caso il provino, a differenza della prova per la valutazione dell'ITSM, deve essere dotato di due lamierini incollati in punti opposti lungo il diametro rispetto al quale si è misurata la rigidità precedentemente. I lamierini servono per l'installazione dei trasduttori necessari alla misurazione delle deformazioni. Una volta applicati questi lamierini il provino viene poggato sul castelletto presente all'interno del macchinario e tenuto fermo dalla barra di carico su cui andrà ad agire il pistone. I trasduttori devono risultare in posizione ortogonale rispetto al pistone.



*Figura 4.51 - Castelletto e testa di carico contenenti il provino a cui sono attaccate barrette e trasduttori*

---

Dopo aver allestito la prova e montato i trasduttori si procedere con l'apertura del software ITFT :

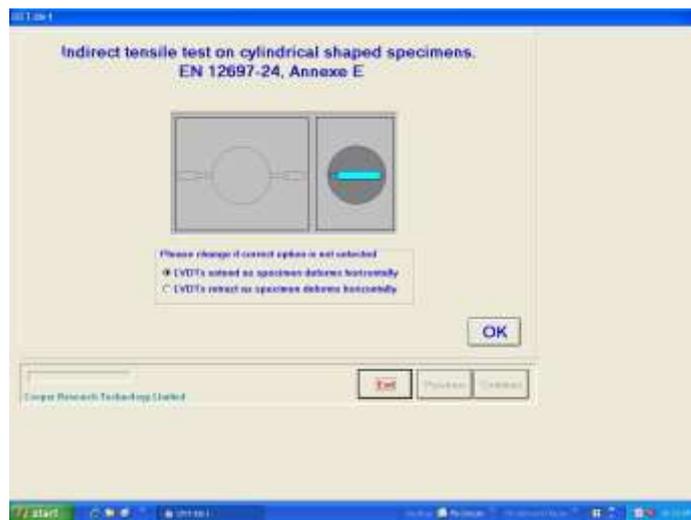


Figura 4.52 - Schermata iniziale software ITFT

Si inserisce poi il nome del provino che si sta testando:

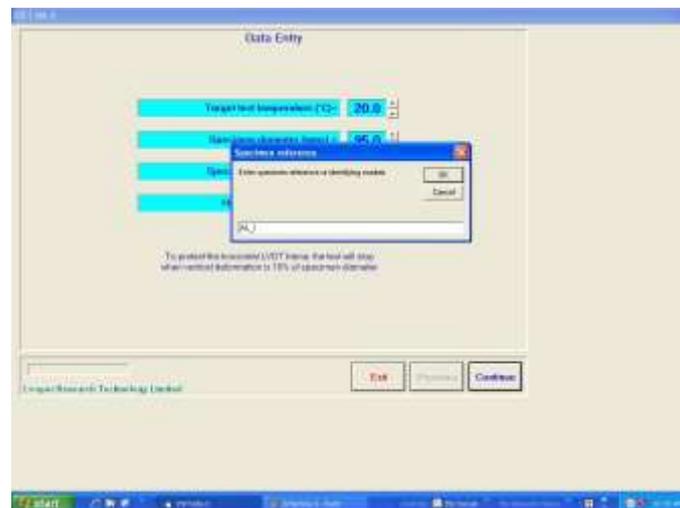


Figura 4.53 - Inserimento nome provino

Poi si inseriscono tutti i parametri:

- Temperatura di prova;
- Diametro del provino;
- Altezza del provino;
- Tensione orizzontale imposta.



Figura 4.54 - Inserimento dati provino

I provini sono stati sottoposti a prove ITSM preliminari per determinare il modulo di rigidezza in trazione indiretta. In base a questi risultati sono stati stimati i valori della tensione orizzontale imposta iniziale  $\sigma_0$  da inserire nel software ITFT. Dopo i primi 115 cicli, il software fornisce il valore della deformazione iniziale  $\varepsilon_0$  che sarà utile per costruire la curva di fatica.

Dopo aver inserito tutti i dati, il software richiede il corretto posizionamento dei trasduttori: anche in questa prova, come per la prova di modulo anche se con un allestimento differente, i trasduttori vengono regolati attraverso le due viti di cui è dotato un lamierino. Il corretto posizionamento, basato su una precedente taratura dei trasduttori, è indicato attraverso lo stazionamento delle due lancette comparse sul monitor nel tratto compreso tra le due zone rosse. In particolare, durante la sperimentazione, si è fatto coincidere le lancette sul livello 1.

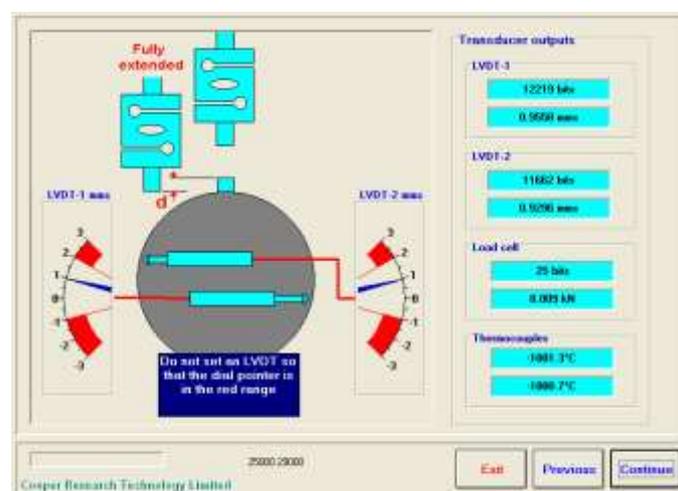


Figura 4.55 - Posizionamento corretto dei trasduttori

---

A questo punto, cliccando sul tasto start test che è comparso sul monitor, il pistone andrà in posizione trovando il contatto con la barra di carico e il test si avvierà automaticamente.



Figura 4.56 - Prova di fatica in esecuzione

La prova si arresterà al raggiungimento del punto di rottura del provino.

# 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.

In particolare, questa tesi si pone l'obiettivo di valutare e confrontare le caratteristiche prestazionali nel tempo delle diverse emulsioni bituminose impiegate nei diversi provini attraverso:

1. Prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
2. Prove di rottura a trazione indiretta (ITS);
3. Prove a fatica (ITFT).

## **5.1. EMULSIONE NORMALE (N)**

- 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;
- Le prove a fatica sono state eseguite sui seguenti provini:  
AN\_I (sup ed inf); AN\_2(sup ed inf); AN\_3(sup ed inf); AN\_IV(sup ed inf); DN\_XI(sup ed inf);  
DN\_XII(sup ed inf); DN\_XIV(sup ed inf).

### **5.1.1 Risultati 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		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	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	-	-	-	-	-	-
		<b>media</b>	<b>0,418</b>		<b>media</b>	<b>0,481</b>		<b>media</b>	<b>0,461</b>		<b>media</b>	<b>0,508</b>

Tabella 5.1 - Valori ITS nel tempo per la famiglia N

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

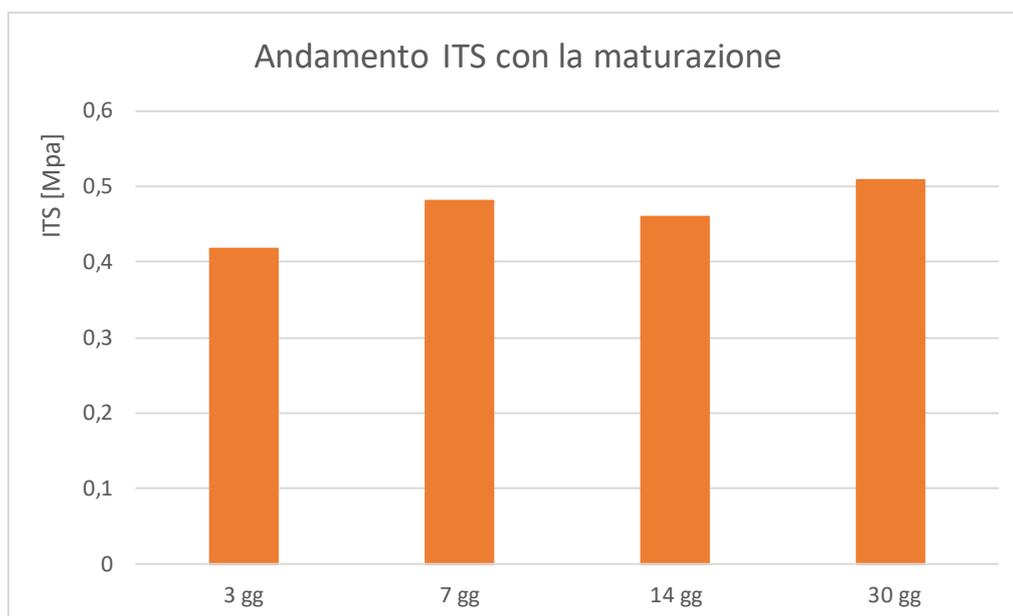


Figura 5.1 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia N

### **5.1.2. Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM)**

La 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 <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [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
		<b>media</b>	<b>3961</b>		<b>media</b>	<b>4544</b>		<b>media</b>	<b>4882</b>		<b>media</b>	<b>5219</b>

Tabella 5.2 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia N

Notiamo che il valore dei moduli cresce nel tempo e come tale incremento è notevole dai 3 ai 7 giorni. Questo è legato all'aumento della rigidità dovuta alla maturazione del cemento all'interno della miscela. Lo stesso risultato, per un maggiore impatto visivo è riassunto nel seguente grafico:

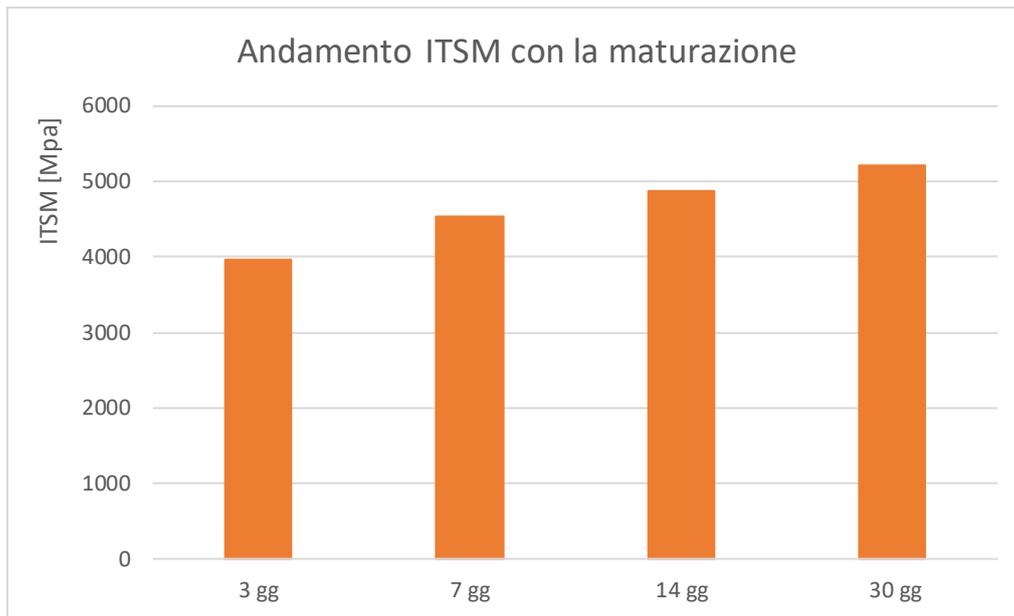


Figura 5.2 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia N

### 5.1.3. Risultati prove di fatica (ITFT)

I provini, come già detto in precedenza, sono stati sottoposti a prove ITSM preliminari per determinare il modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta. In base a questi risultati sono stati stimati i valori della tensione imposta iniziale  $\sigma_{effettivo}$  da inserire nel software ITFT. Dopo i primi 115 cicli, il software fornisce il valore della deformazione iniziale  $\epsilon_{115}$ , utile a determinare le curve di fatica di seguito riportate.

Codice	hm [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{effettivo}$ [MPa]	$\epsilon_{115}$	n° cicli
AN_I sup	54,5	94,0	6329	400	182	2350
AN_I inf	60,0	94,0	6658	400	166	5370
AN_II sup	57,9	94,0	6055	250	103	103000
AN_II inf	54,3	94,0	6605	375	180	5000
AN_III sup	57,2	94,0	5131	200	89	-
AN_III inf	56,5	94,0	5821	300	122	34000
AN_IV sup	56,4	94,0	6137	300	209	2500
AN_IV inf	62,5	94,0	5437	225	144	212000
DN_XI sup	55,4	94,0	6519	325	161	7000
DN_XI inf	51,9	94,0	6795	425	241	1190
DN_XII sup	55,1	94,0	6097	300	175	8500
DN_XII inf	49,4	94,0	6335	350	147	15000
DN_XIV sup	55,7	94,0	4603	200	122	49000
DN_XIV inf	51,4	94,0	5228	215	98	191500

Tabella 5.3 - Risultati prove di fatica famiglia N, Emulsione Tradizionale

Sono state inoltre riportate le curve di fatica in scala bilogarithmica.

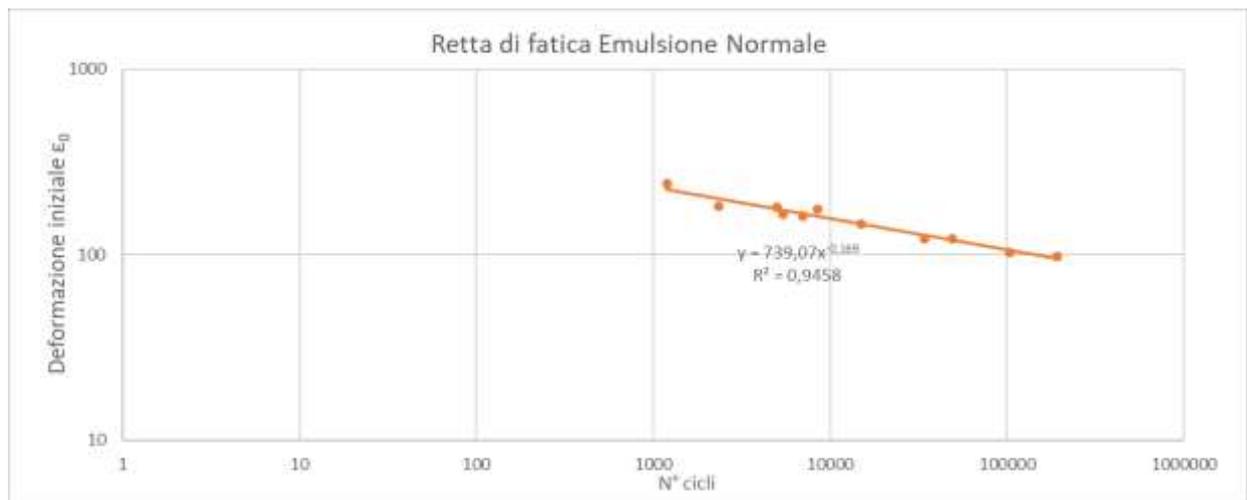


Figura 5.3 - Retta di fatica ( $N^\circ$  cicli;  $\epsilon_0$ ) Emulsione Tradizionale

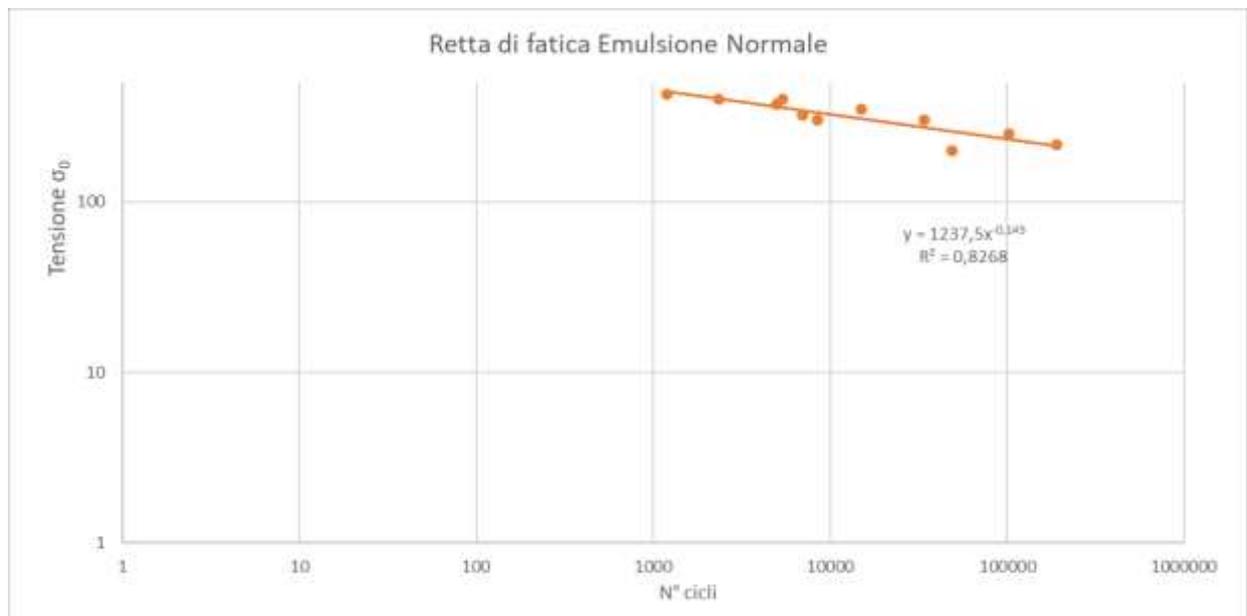


Figura 5.4 - Retta di fatica ( $N^\circ$  cicli;  $\sigma_0$ ) Emulsione Tradizionale

## **5.2. EMULSIONE MODIFICATA CON POLIMERI (P)**

- Il modulo di rigidezza 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;

- Le prove a fatica sono state eseguite sui seguenti provini:  
 AP\_I (sup ed inf); AP\_II (sup ed inf); AP\_III (sup ed inf); AP\_IV (sup ed inf); EP\_XV (sup ed inf);  
 EP\_XVI (sup ed inf); EP\_XVII (sup ed inf).

### 5.2.1. Risultati 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		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	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	-	-	-	-	-	-
		<b>media</b>	<b>0,373</b>		<b>media</b>	<b>0,458</b>		<b>media</b>	<b>0,504</b>		<b>media</b>	<b>0,521</b>

Tabella 5.4 - Valori ITS nel tempo per la famiglia P

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

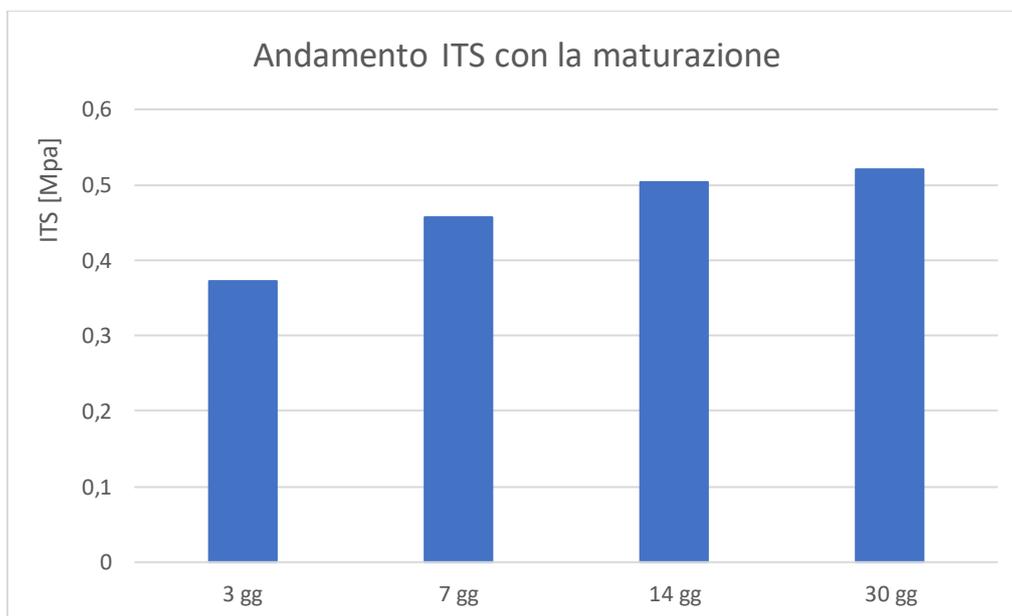


Figura 5.5 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia P

### 5.2.2. Risultati prove di modulo 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 <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [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
		<b>media</b>	<b>3471</b>		<b>media</b>	<b>4208</b>		<b>media</b>	<b>4539</b>		<b>media</b>	<b>4936</b>

Tabella 5.5 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia P

Possiamo notare come il valore dei moduli cresca nel soprattutto dai 3 ai 7 giorni. Questo è legato all'aumento della rigidità dovuta alla maturazione del cemento all'interno della miscela.

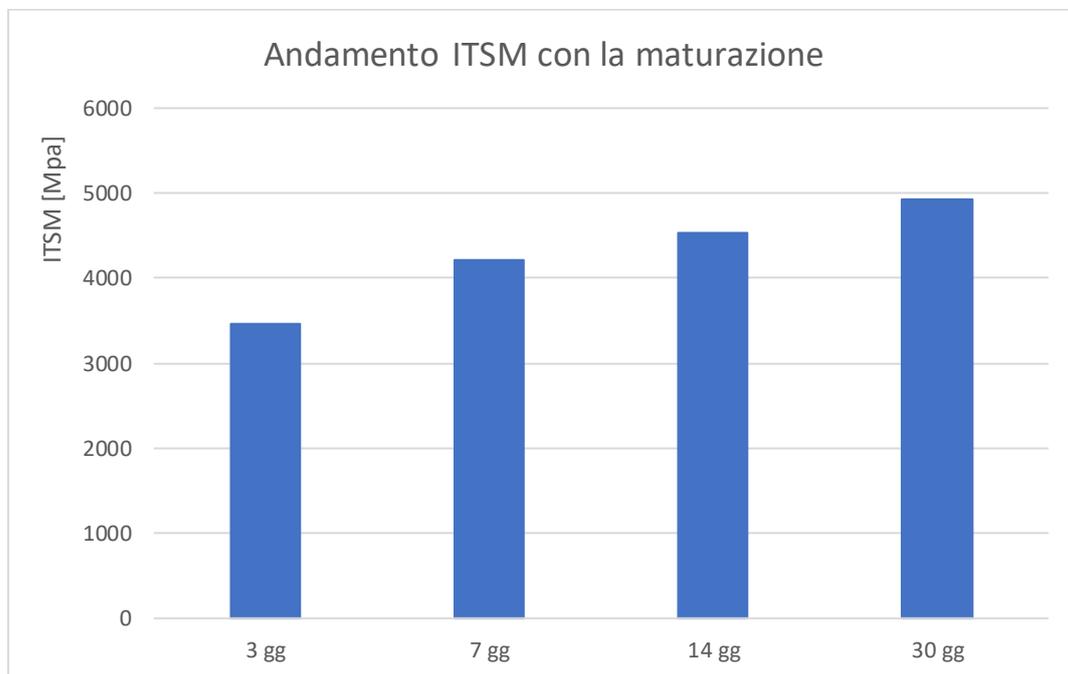


Figura 5.6 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia P

### 5.2.3. Risultati prove a fatica (ITFT)

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dalle prove di fatica, utile per la determinazione delle rette di fatica in scala bilogarithmica:

Codice	$h_m$ [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{\text{effettivo}}$ [MPa]	$\epsilon_{115}$	n° cicli
AP_I sup	52,5	94,0	6822	400	141	15000
AP_I inf	53,2	94,0	6498	325	125	53010
AP_II sup	55,5	94,0	6187	300	144	9500
AP_II inf	56,8	94,0	5802	250	119	-
AP_III sup	57,1	94,0	5913	275	128	23960
AP_III inf	60,6	94,0	6073	350	174	5550
AP_IV sup	54,3	94,0	5585	225	160	199000
AP_IV inf	54,8	94,0	5485	225	106	124000
EP_XV sup	56,4	94,0	6856	450	230	1730
EP_XV inf	56,5	94,0	6553	375	161	6100
EP_XVI sup	56,1	94,0	6880	450	222	1770
EP_XVI inf	55,2	94,0	5871	400	223	2500
EP_XVII sup	56,0	94,0	5899	250	100	-
EP_XVII inf	56,3	94,0	5883	250	106	218000

Tabella 5.6 – Risultati prove di fatica famiglia P, Emulsione modificata con Polimeri

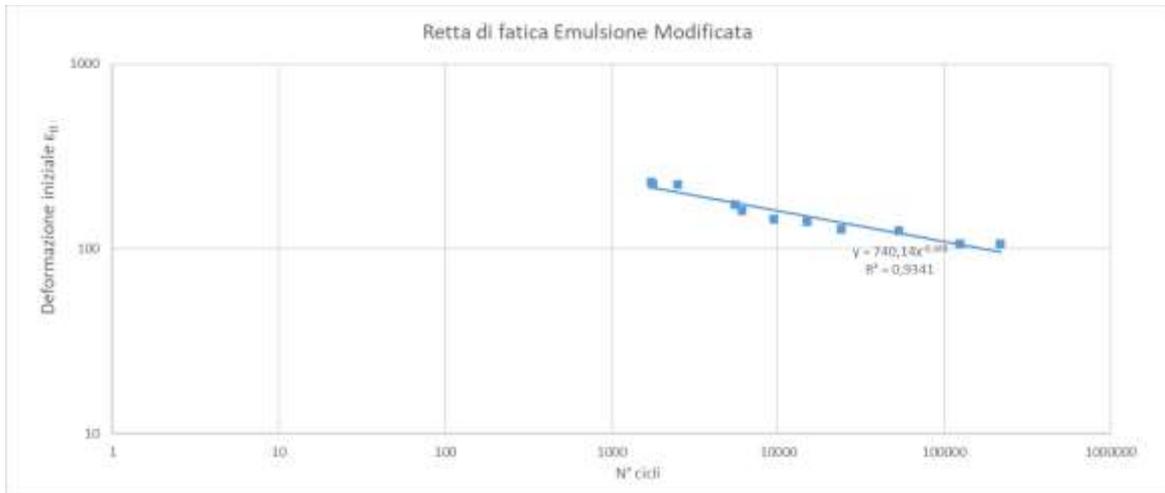


Figura 5.7 – Retta di fatica (N° cicli;  $\epsilon_0$ ) Emulsione Modificata

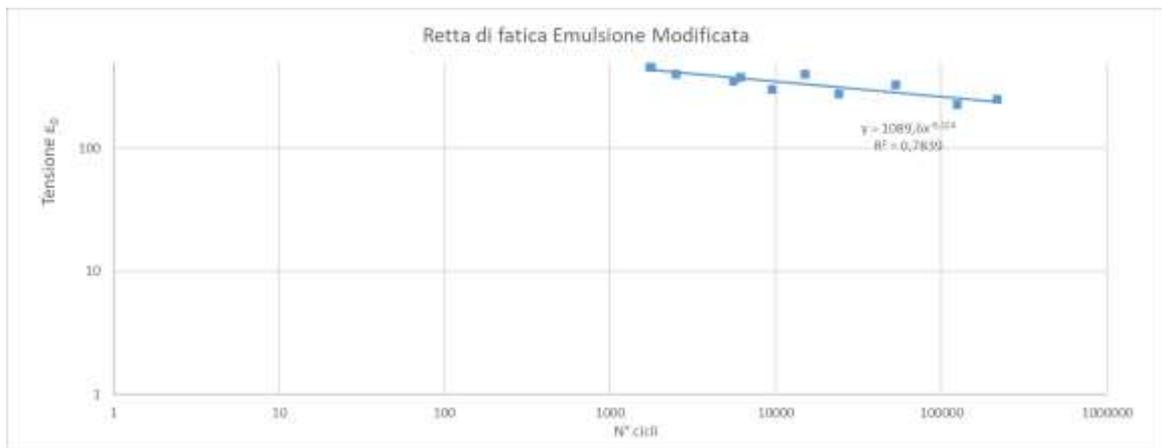


Figura 5.8 – Retta di fatica (N° cicli;  $\sigma_0$ ) Emulsione Modificata

### 5.3. EMULSIONE CON LATTICE (L)

- Il modulo di rigidezza 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;
- Le prove a fatica sono state eseguite sui seguenti provini:  
AL\_IV (sup e inf); BL\_V(sup e inf); BL\_VI(sup e inf); BL\_VII(sup e inf); DL\_XI(sup e inf);  
DL\_XII(sup e inf); DL\_XIII(sup e inf).

#### 5.3.1. Risultati 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		
	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	P [Kn]	ITS [Mpa]	$\epsilon_c$	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	<b>0,380</b>		media	<b>0,471</b>		media	<b>0,489</b>		media	<b>0,462</b>

Tabella 5.7 - Valori ITS nel tempo per la famiglia L

I dati sono stati riassunti nel seguente grafico:

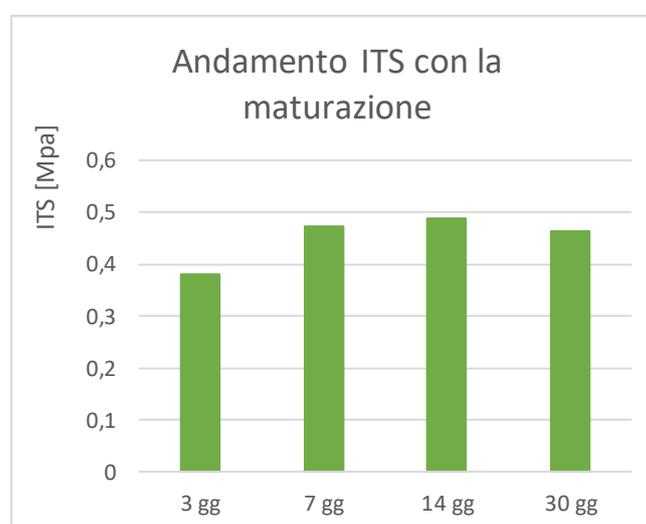


Figura 5.9 - Andamento ITS, con la maturazione, per la famiglia L

### 5.3.2. Risultati prove di modulo a trazione indiretta (ITSM)

Provini	MODULI											
	a 3 gg			a 7 gg			a 14 gg			a 30 gg		
	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [MPa]	ITSM <sub>1</sub> [MPa]	ITSM <sub>2</sub> [MPa]	ITSM <sub>m</sub> [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
		<b>media</b>	<b>3341</b>		<b>media</b>	<b>4060</b>		<b>media</b>	<b>4782</b>		<b>media</b>	<b>5100</b>

Tabella 5.8 - Valori ITSM nel tempo per la famiglia L

Possiamo notare dalla 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 si riportano i risultati:

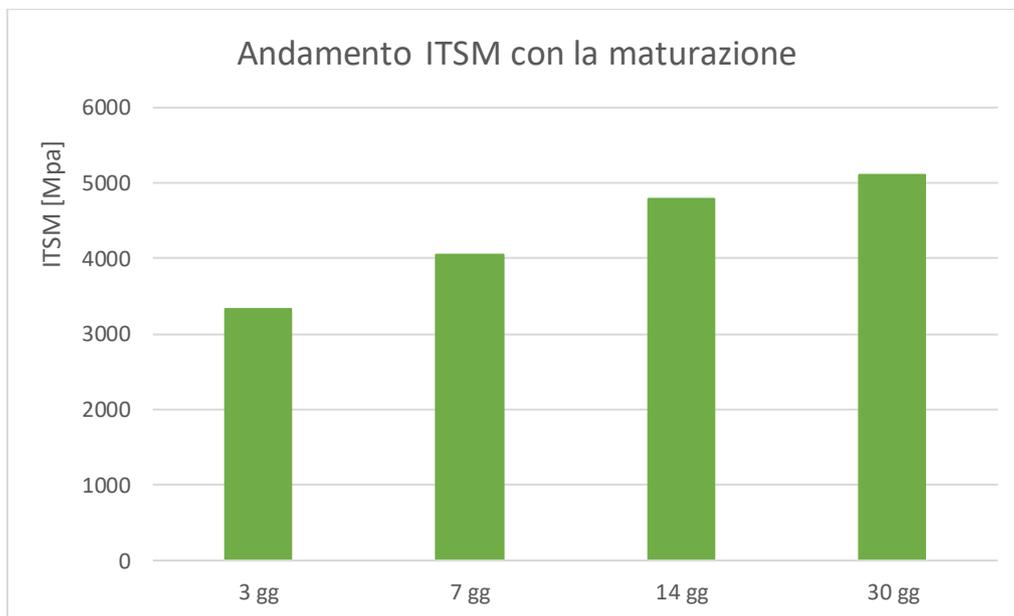


Figura 5.10 - Andamento ITSM, con la maturazione, per la famiglia L

### 5.3.3. Risultati prove a fatica (ITFT)

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dalle prove di fatica, utile per la determinazione delle rette di fatica in scala bilogarithmica.

Codice	hm [mm]	D [mm]	ITSM [MPa]	$\sigma_{\text{effettivo}}$ [MPa]	$\epsilon_0$	n° cicli
AL_IV sup	60,6	94,0	5309	200	104	69500
AL_IV inf	60,3	94,0	5938	275	203	7000
BL_V sup	59,0	94,0	6821	450	279	1140
BL_V inf	60,0	94,0	6950	425	180	5745
BLVI sup	61,0	94,0	6155	400	251	2500
BL_VI inf	60,7	94,0	5872	250	100	195525
BL_VII sup	61,1	94,0	5247	215	97	172500
BL_VII inf	60,8	94,0	5493	275	145	47500
DL_XI sup	55,6	94,0	6016	350	223	3000
DL_XI inf	57,9	94,0	6523	400	194	5560
DL_XII sup	57,7	94,0	6303	330	142	11500
DL_XII inf	57,9	94,0	5698	275	107	106500
DL_XIII sup	58,0	94,0	5386	200	90	146000
DL_XIII inf	57,5	94,0	5889	300	166	10000

Tabella 5.9 - Risultati prove di fatica famiglia L, Emulsione con Lattice

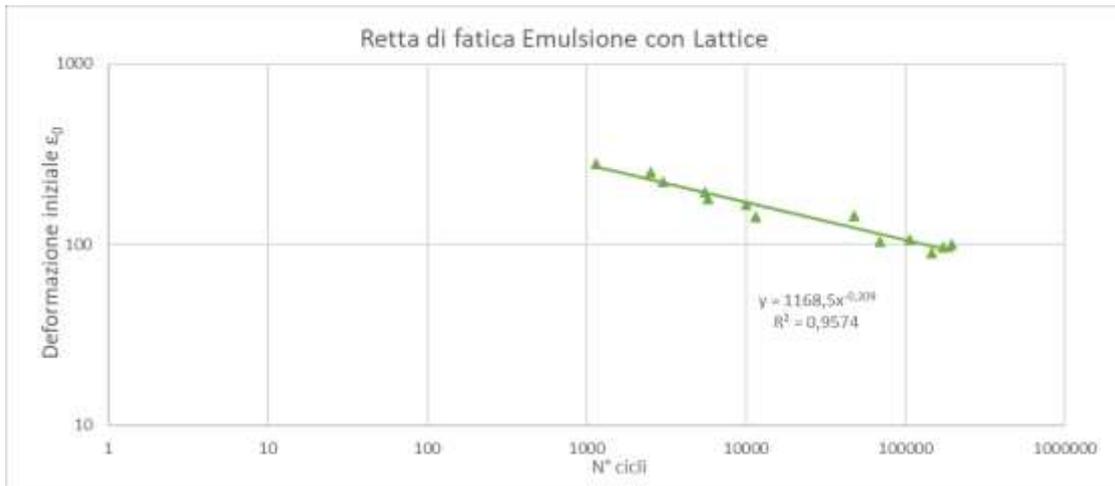


Figura 5.11 - Retta di fatica ( $N^\circ$  cicli;  $\epsilon_0$ ) Emulsione con Lattice

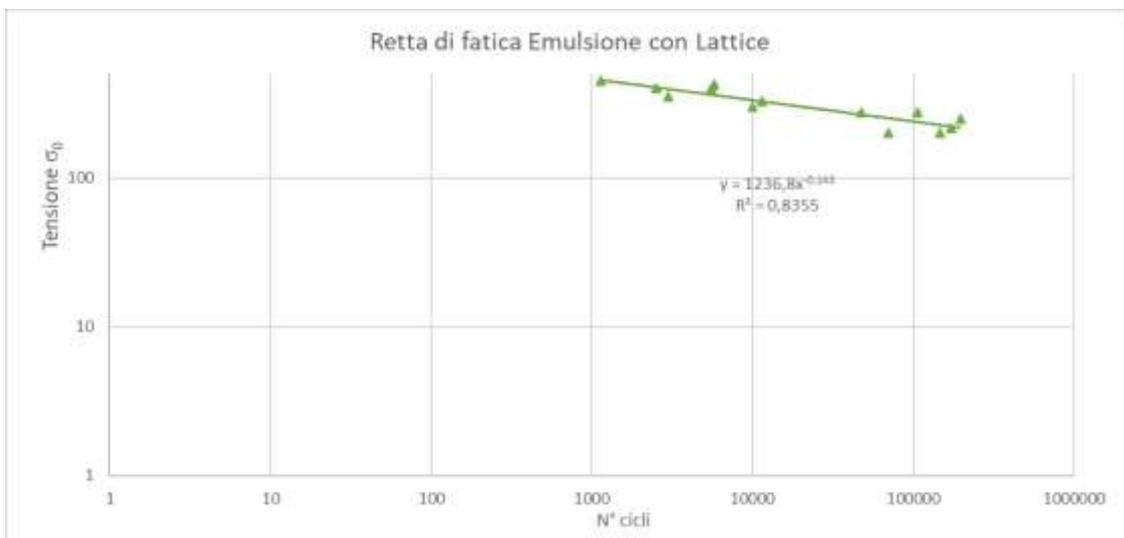


Figura 5.12 - Retta di fatica ( $N^\circ$  cicli;  $\sigma_0$ ) Emulsione con Lattice

## **5.4. CONFRONTO TRA I RISULTATI DELLE DIVERSE FAMIGLIE**

### **5.4.1 Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)**

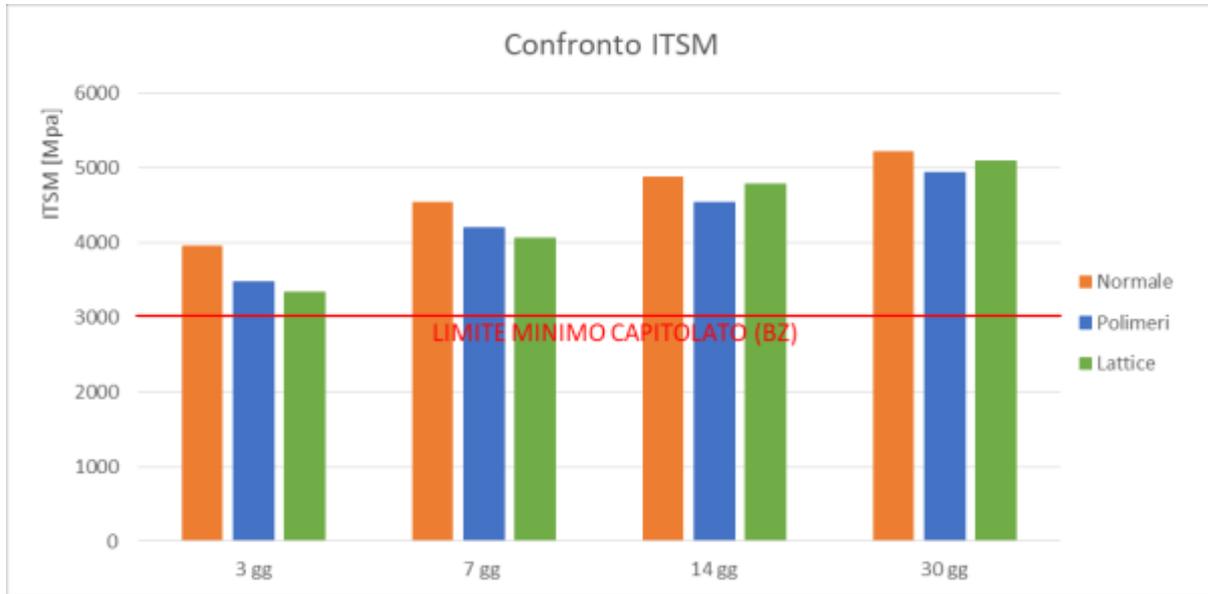


Figura 5.13 - Riepilogo e confronto valori ITSM

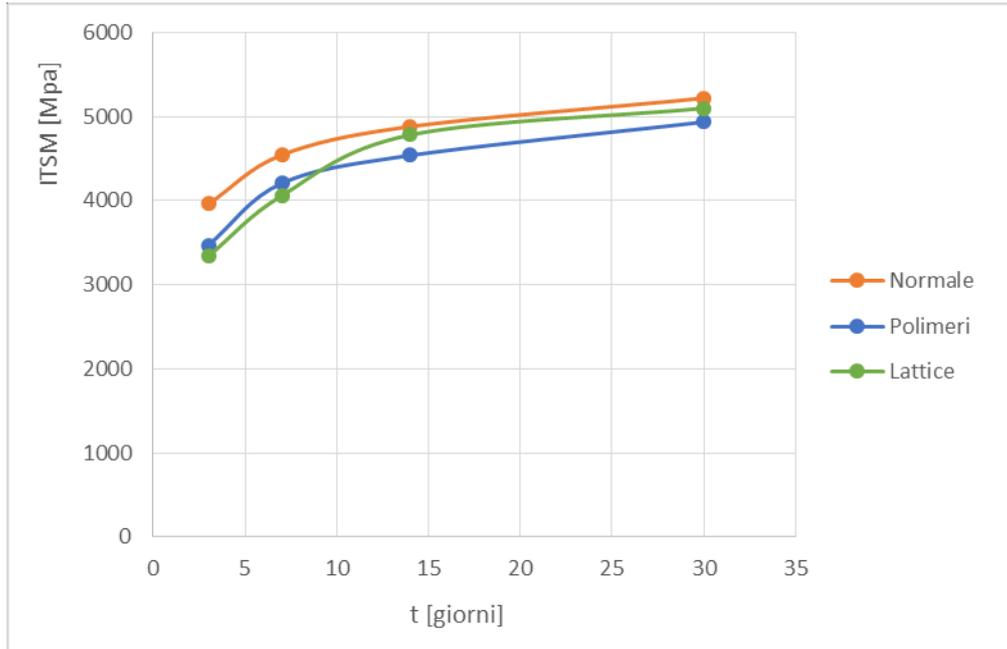


Figura 5.14 - Andamento valori ITSM nel tempo

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, 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 rigidità 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.

### **5.4.2. Rottura a trazione indiretta (ITS)**



Figura 5.15 - Riepilogo e confronto valori ITS

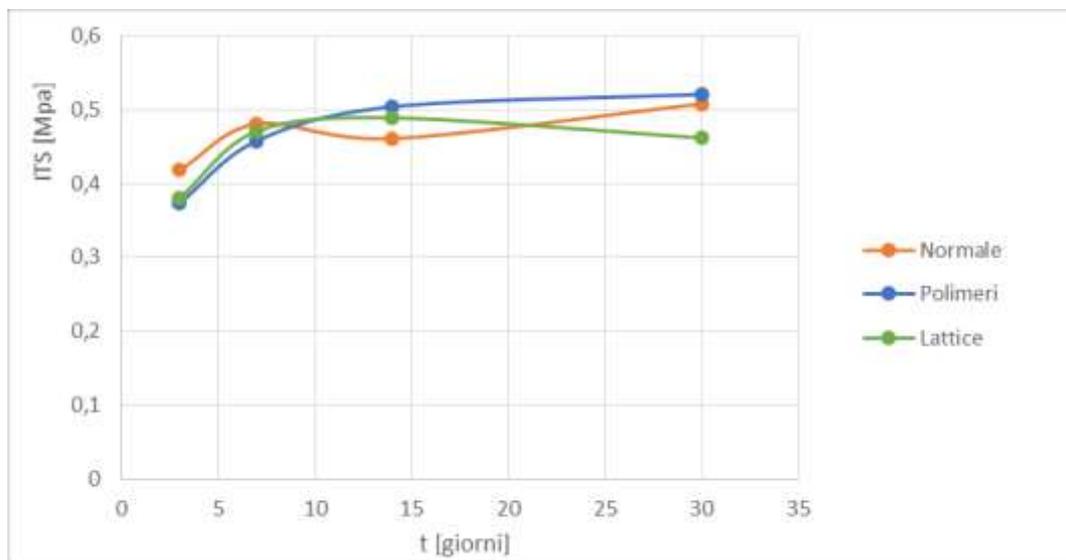


Figura 5.16 - Andamento ITS nel tempo

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

### 5.4.3. Prova a fatica (ITFT)

Di seguito si riportano i confronti delle rette di fatica in termini di deformazione e di tensione. Sono stati riportati i vari dati ed eseguite le regressioni lineari fino ad avere un valore di  $R^2$  più vicino possibile a 1: la migliore regressione è avvenuta con la funzione potenza.

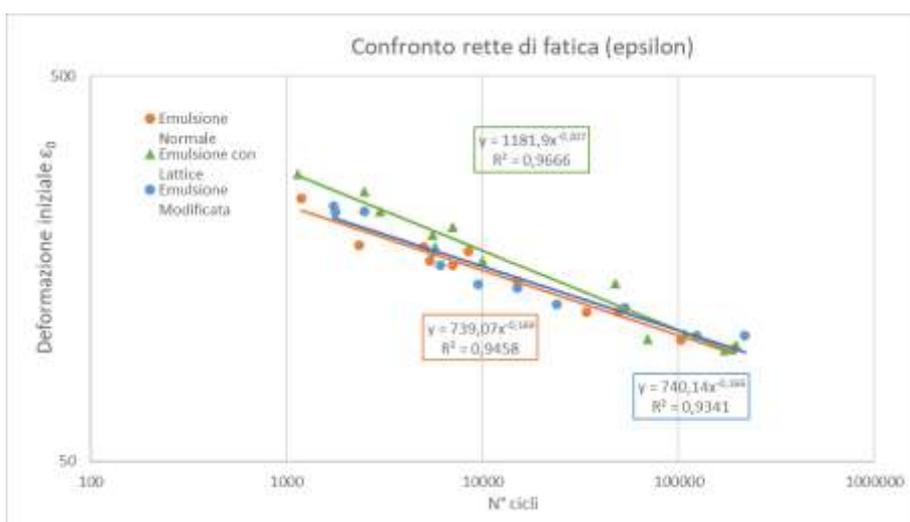


Figura 5.17 - Confronto rette di fatica in termini di deformazione iniziale  $\epsilon_0$

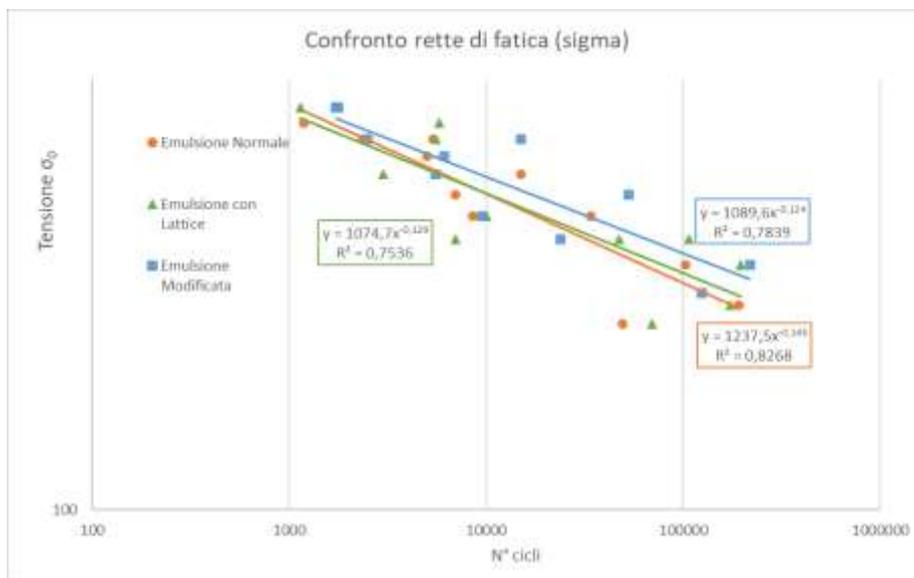


Figura 5.18 - Confronto rette di fatica in termini di tensione iniziale  $\sigma_0$

---

Dal confronto delle rette di fatica in termini di tensione sembrerebbe esserci un miglior comportamento della miscela realizzata con emulsione modificata con polimeri SBS. In realtà questo risultato potrebbe essere dovuto ad una maggiore rigidità del materiale, il quale non mostra l'effettivo comportamento a fatica del conglomerato. Infatti, sarebbe più corretto andare ad analizzare il grafico di confronto in termini di deformazione dove, sebbene ci sia un leggero distacco tra la miscela confezionata con il lattice e le altre due famiglie a causa delle piccole differenze di ripetibilità della prova, i materiali sembrerebbero comparabili.

## **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

### **6.1. MODULO DI RIGIDEZZA A TRAZIONE INDIRETTA (ITSM) E RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA (ITS)**

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

- In generale, le tre emulsioni hanno una tendenza 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;

---

## **6.2. PROVA A FATICA (ITST)**

Dall'analisi dei risultati è stato possibile dedurre che dal confronto delle miscele realizzate con le tre emulsioni non si notano sostanziali differenze in termini di comportamento a fatica.

## **6.3. CONSIDERAZIONI FINALI**

Quindi possiamo dire che l'effetto della tipologia di emulsione non influenza significativamente il comportamento della miscela 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, in quanto nel capitolo dedicato ai materiali si è sottolineato come l'utilizzo dei polimeri comporti un aumento di spesa del 20% circa.

Le prove eseguite in questa tesi rappresentano solo una parte del lavoro svolto per confrontare queste tre emulsioni. Infatti, sono state parallelamente eseguite anche:

- Curve di compattazione e parametri di lavorabilità;
- Calcolo dei vuoti;
- Perdita di acqua;
- Valutazione della sensibilità all'acqua;
- Determinazione del modulo complesso a compressione.

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**

[S1] [https://documen.site/download/evoluzione-della-strada-nella-storia\\_pdf](https://documen.site/download/evoluzione-della-strada-nella-storia_pdf)

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

[B1]” *Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali*”, a cura di Felice A. Santagata

[B2] Sgattoni Gloria – *Tesi Magistrale “Variazione delle prestazioni delle basi a freddo in funzione dei tempi di maturazione”*

[B3] [https://amslaurea.unibo.it/1746/1/Rosa\\_Lucia\\_Tesi.pdf](https://amslaurea.unibo.it/1746/1/Rosa_Lucia_Tesi.pdf)

[B4] Antonio Pio Caruso – *Tesi Magistrale “ Confronto prestazionale di basi a freddo confezionate con tre diverse tipologie di emulsione”*

---

## ***Ringraziamenti***

Ringrazio innanzi tutto il Professor Maurizio Bocci, il quale mi ha dato la possibilità di toccare con mano un argomento così importante come quello del riciclaggio a freddo delle pavimentazioni stradali.

Ringrazio il mio correlatore, l'Ingegnere Carlo Carpani, sempre disponibile a chiarire con pazienza ogni mio più piccolo dubbio durante la sperimentazione e la stesura di questa tesi e non solo.

Ovviamente i miei più sentiti ringraziamenti vanno a tutta la mia famiglia, la quale mi ha sempre sostenuto e supportato sotto ogni punto di vista durante questo percorso di studi appena conclusosi.

In ultimo, ma non per importanza ringrazio ed auguro il meglio a tutti gli amici e colleghi incontrati durante tutti gli studi, in maniera particolare Alex, con il quale ho condiviso, anche come coinquilino, tutti gli alti e i bassi di questo percorso, affrontati anche grazie a tutti i caffè "acchittati" ad orari piuttosto inusuali per portare avanti "il tritume".