UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
DELL'ARCHITETTURA (DICEA)

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE*

# *Studio della resistenza a fatica di miscele riciclate tiepide*

# *Study of fatigue resistance of warm recycled mixes*

*Relatore:*
Chiar.mo Prof. Ing. **Fabrizio Cardone**

*Tesi di laurea di:*
**Gloria Sgattoni**

*Correlatore:*
Dott. Ing. **Gilda Ferrotti**

Anno Accademico 2018/2019

*A mia madre, per avermi indicato la strada*

*A mio padre, per avermi riempita d'amore*

*A mio fratello, per avermi tenuta sempre per mano*

*Alla mia amica Alessia, fonte di ispirazione e supporto quotidiano*

*Alla mia famiglia e ai miei amici per aver fiducia in me.*

# *INDICE*

Capitolo 1 - INTRODUZIONE....4
Capitolo 2 - Sostenibilità nelle costruzioni stradali....5
2.1 ECONOMIA CIRCOLARE .... 5
2.2 SOSTENIBILITA' IN AMBITO STRADALE. .... 8
2.3 TECNICHE DI RICICLAGGIO.... 8
2.4 TECNOLOGIE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI TIEPIDI (WMA) .... 10
2.4.1 Tipologie di tecniche WMA .... 12
2.4.2 Benefici della tecnologia WMA .... 17
Capitolo 3 - Indagine sperimentale e materiali utilizzati ....19
3.1 Programma sperimentale.... 19
3.2 Organizzazione sperimentale .... 19
3.3 I materiali.... 19
3.3.1 Il bitume tradizionale.... 19
3.3.2 Gli aggregati vergini .... 20
3.3.3 RAP.... 23
3.3.4 Additivo.... 25
3.4 Confezionamento dei provini .... 25
3.5 Nomenclatura dei provini.... 28
3.6 Prove di caratterizzazione meccanica .... 30
3.6.1 NAT .... 31
3.6.2 Prova di modulo.... 32
3.6.3 Prova di resistenza a fatica .... 38
Capitolo 4 - Risultati sperimentali....41
4.1 Il modulo di rigidezza.... 41
4.2 La resistenza a fatica.... 43
Capitolo 5 - Conclusioni ....46
BIBLIOGRAFIA ....46

**Tabella 2.1** – *Caratteristiche bitume 50/70*.... 20
**Tabella 2.2** - Granulometrie aggregati vergini .... 22
**Tabella 2.3** - Granulometrie RAP impiegato.... 24
**Tabella 2.4** - *Caratteristiche fisico-chimiche additivo* .... 25
**Tabella 2.5** - Ricetta MIX C0-15 (REF).... 28
**Tabella 2.6** – Ricetta MIX C2-30-3.4 .... 29
**Tabella 2.7** – Ricetta MIX C2-20-4.1 .... 29
**Tabella 2.8** – *Programma sperimentale* .... 31
**Tabella 3.1** - Moduli di rigidezza miscela C0-15 (REF).... 41

**Tabella 3.2** - Moduli di rigidezza miscela C2-30-3.4 ..... 41
**Tabella 3.3** - Moduli di rigidezza miscela C2-20-4.1 ..... 42
**Tabella 3.4** - Vuoti miscela C0-15 (REF) ..... 43
**Tabella 3.5** - Vuoti miscela C2-20-4.1 ..... 43
**Tabella 3.6** - Vuoti miscela C2-30-3.4 ..... 43
**Tabella 3.7** - Risultati prova di resistenza a fatica miscela C0-15 ..... 44
**Tabella 3.8** - Risultati prova di resistenza a fatica miscela C2-30-3.4 ..... 44
**Tabella *3*.9** - Risultati prova di resistenza a fatica miscela C2-20-4.1 ..... 44

**Figura 1.1 -** Tecniche di riciclaggio ..... 9
**Figura 1.2 -** *Impianto fisso discontinuo* ..... 9
**Figura 1.3** – *Rotore del riciclaggio in sito* ..... 10
**Figura 1.4** – *Range delle temperature di lavorazione in funzione della tecnica scelta* ..... 11
**Figura 1.5** – *Processo di schiumatura* ..... 13
**Figura 1.6** – *Additivo zeolite* ..... 14
**Figura 1.7** – *Additivo organico o cera* ..... 15
**Figura 1.8** – *Additivo chimico* ..... 15
**Figura 2.1** - Graniglia basaltica 4/8 ..... 21
**Figura 2.2** - Sabbia calcarea 0/2 ..... 21
**Figura 2.3** - Graniglia calcarea 7/12 ..... 21
**Figura 2.4** - Graniglia basaltica 8/14 ..... 22
**Figura 2.5** – Filler calcareo ..... 22
**Figura 2.6** - Curve granulometriche aggregati ..... 23
**Figura 2.7** - RAP 0/5 non modificato ..... 23
**Figura 2.8** - RAP 0/5 misto ..... 23
**Figura 2.9** - Curva granulometrica RAP impiegato ..... 24
**Figura 2.10** - Fuso e curva granulometrica ..... 25
**Figura 2.11** - Miscelatore ..... 26
**Figura 2.12** - Inserimento aggregati nel miscelatore ..... 26
**Figura 2.13** - Inserimento nel miscelatore del bitume ..... 26
**Figura 2.14** - Miscela ottenuta ..... 27
**Figura 2.15** - Inserimento filler nella miscela ..... 27
**Figura 2.16** - Miscela finale ottenuta ..... 27
**Figura 2.17** - Scarico della miscela per realizzazione provini ..... 27
**Figura 2.18** - Divisione del materiale in un contenitore ..... 27
**Figura 2.19** - Pressa giratoria ..... 28
**Figura 2.20** - Provino ottenuto ..... 28
**Figura 2.21** - Provini ottenuti ..... 30
**Figura 2.22** - NAT con provino sottoposto alla prova di modulo ..... 32
**Figura 2.23** - Stato di sollecitazione durante la prova di modulo ..... 34
**Figura 2.24** - Forma d'onda per la prova di modulo a trazione indiretta ..... 35
**Figura 2.25** - Parametri di input richiesti dal software della prova di modulo ..... 37
**Figura 2.26** - Output della prova di modulo ..... 37
**Figura 2.27** - NAT con provino sottoposto alla prova di fatica ..... 38
**Figura 2.28** - Parametri di input per la prova di resistenza ai carichi ripetuti ..... 39
**Figura 2.29** - Output della prova di resistenza ai carichi ripetuti ..... 39
**Figura 2.30** - Curva di fatica ..... 40
**Figura 3.1** - Moduli di rigidezza delle tre miscele a confronto ..... 42

**Figura 3.2** - Resistenza a fatica delle tre miscele a confronto ..... 45

**Equazione 2.1** ..... 30
**Equazione 2.2** ..... 30
**Equazione 2.3** ..... 33
**Equazione 2.4** ..... 33
**Equazione 2.5** ..... 33
**Equazione 2.6** ..... 33
**Equazione 2.7** ..... 34
**Equazione 2.8** ..... 34
**Equazione 2.9** ..... 34
**Equazione 2.10** ..... 35
**Equazione 2.11** ..... 40
**Equazione 2.12** ..... 40

## *Capitolo 1 - Introduzione*

Lo sviluppo economico ed industriale che è progredito negli ultimi decenni ha portato ad un'espansione e ramificazione delle attività umane sempre più rilevante, quindi ad una richiesta crescente di infrastrutture viarie con caratteristiche prestazionali più performanti, atte a soddisfare tale fabbisogno. Questo si traduce in un sostanziale aumento del traffico veicolare, in particolare di mezzi pesanti, a cui bisogna far fronte articolando le reti viarie e fornendo tecnologie realizzative più durature ed efficienti. Tale soluzione però non basta, in quanto queste tecnologie, oltre ad essere più durature ed efficienti devono anche tener conto della salvaguardia ambientale, oggi problema di notevole importanza. Tutto questo si traduce nell'adozione di un'economia circolare che consiste in un sistema economico e produttivo capace di autorigenerarsi; per far sì che questo avvenga si devono andare a sfruttare i rifiuti per produrre nuovi prodotti.

In tale contesto, si inserisce lo studio di conglomerati bituminosi tiepidi (WMA – Warm Mix Asphalt) a cui viene affidato il compito di prolungare la vita utile della pavimentazione stradale, di limitare gli interventi di manutenzione andando ad incrementare le prestazioni meccaniche e le resistenze alle differenti sollecitazioni di carico e tenendo conto, allo stesso tempo, di ridurre ai minimi livelli l'impatto ambientale.

I conglomerati bituminosi tiepidi si ottengono dalla miscelazione di aggregati e legante con l'utilizzo di maggiori quantitativi di fresato a cui vengono aggiunti degli additivi che hanno come scopo quello di garantire la lavorabilità del prodotto nonostante l'elevato contenuto di RAP (Reclaimed Asphalt Pavement).

In questa sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura", dell'Università Politecnica delle Marche, si è voluto studiare l'effetto delle tecnologie tiepide per la produzione di conglomerati bituminosi con l'impiego di maggiori quantitativi di RAP, tramite anche un confronto diretto in termini prestazionali con le tecnologie tradizionali.

La campagna di indagine è stata sviluppata secondo due sezioni principali: in prima analisi, è stata effettuata la caratterizzazione meccanica delle miscele in termini di rigidezza, mediante *"Prove di Modulo"*; successivamente, si è voluto studiare la resistenza a fatica di queste tramite "*Prove di resistenza a fatica*".

Al termine di ciascuna fase di studio sono stati ricavati i parametri caratteristici relativi a ciascuna famiglia esaminata e su di essi sono state osservate peculiarità e similitudini (riportate nel capitolo 5).

La seguente tesi si sviluppa in cinque capitoli:

- Capitolo 1 – INTRODUZIONE;
- Capitolo 2 – SOSTENIBITILA' NELLE COSTRUZIONI STRADALI: viene descritto il conglomerato bituminoso tiepido, le fasi di lavorazione e gli eventuali additivi;
- Capitolo 3 – INDAGINE SPERIMENTALE E MATERIALI UTILIZZATI: viene presentato il programma sperimentale, il confezionamento delle miscele, la descrizione delle prove eseguite e dell'analisi dei dati.
- Capitolo 4 – RISULTATI SPERIMENTALI: si riportano i risultati ottenuti dalle varie prove eseguite, i confronti, grafici e tabelle opportunamente presentati e commentati;
- Capitolo 5 - CONCLUSIONI

# *Capitolo 2 - Sostenibilità nelle costruzioni stradali*

## *2.1 ECONOMIA CIRCOLARE*

Con il termine "Economia circolare" si intende un sistema economico e produttivo capace di autorigenerarsi. Per far sì che questo avvenga si devono andare ad utilizzare i rifiuti per creare nuovi prodotti sfruttando fonti energetiche rinnovabili.

Molte aziende stanno già utilizzando questo modello ma per ottenere una società caratterizzata da un sistema sostenibile ci deve essere la collaborazione di tutte le aziende e quindi una connessione tra esse.

La necessità di utilizzare questo nuovo modello è nata a seguito della preoccupazione ambientale, in cui ci si è accorti che consumiamo risorse ad una velocità superiore della loro capacità di autorigenerarsi.

In natura non esistono rifiuti, ciò che è rifiuto per una specie vivente diventa una risorsa per un'altra; noi ci dobbiamo impegnare ad imitare questo sistema e dobbiamo abbandonare l'abitudine di estrarre, produrre, usare e buttare conosciuta come "Economia lineare" e sostituirla piuttosto con l'applicazione del modello di "Economia circolare" basato sulle tre "R":

- Ridurre (ad es. l'uso di materie prime)
- Riusare/riutilizzare
- Riciclare

Il **riuso** è l'operazione mediante la quale un prodotto viene rifunzionalizzato per lo stesso scopo al termine del suo ciclo di vita, mentre il **riutilizzo** considera un nuovo uso di un prodotto in un ruolo differente dallo scopo originale per cui è stato progettato. In entrambi i casi non esiste un processo di modifica del materiale. L'uso di un materiale riusato/riusabile apre due principali temi; il primo è legato al concetto di fine vita che deve essere invece concepito come *fine vita utile*. La fase di fine vita utile va considerata e pensata dalla progettazione del prodotto idealizzato per poter essere riusato/riutilizzato. Tali potenzialità sono legate alla capacità dello stesso di soddisfare diverse esigenze e poter essere facilmente ricollocato. Il secondo tema è legato al concetto di *durabilità.* Un prodotto per poter essere riusato/riutilizzato deve mantenere nel tempo i propri requisiti.

Il **riciclaggio** riguarda il processo attraverso il quale i rifiuti vengono trasformati in un materiale secondario per l'esecuzione dello scopo originale o altri scopi. Nel caso di riciclo, il prodotto arriva a fine vita ma deve essere concepito come materia prima per un altro processo, per cui il materiale arrivato a fine vita non deve essere etichettato come rifiuto ma come risorsa.

Gli italiani negli ultimi anni hanno dimostrato una notevole sensibilità in ambito rifiuti attraverso la crescita delle percentuali relative al riciclo e una significativa sensibilità riguardo gli sprechi che si sono ridotti notevolmente; ciò significa che il consumatore si concentra maggiormente sulla qualità del prodotto privilegiando la sostenibilità di quest'ultimo. Tutto questo può essere tradotto in un passo decisivo per ottenere un consumo che sia rispettoso dell'ambiente.

La Commissione Europea il 2 dicembre 2015 andò a redigere un piano d'azione dove venivano indicate le misure relative al ciclo di vita dei prodotti per l'adozione di un'economia circolare. Quest'ultima oltre a proporre vantaggi economici alle imprese, dà anche loro la possibilità di

diventare più competitive, presenta la possibilità di ottenere benefici per l'ambiente a seguito anche di significativi risparmi di energia, crea posti di lavoro e offre l'opportunità di integrazione sociale.

A livello internazionale ci si è posti, invece, il problema dei cambiamenti climatici dovuti all'effetto serra e al riscaldamento della terra la cui soluzione viene indicata nel Protocollo di Kyoto (trattato internazionale redatto il 7 Dicembre del 1997 nella città giapponese) e può essere tradotta nella riduzione delle emissioni di gas. Per far sì che questo avvenga, le misure adottate da tale documento prevedono l'istituzione e quindi l'adozione di tecniche innovative finalizzate non solo ad una riduzione del consumo di energia ma anche di risorse naturali non rinnovabili.

La parola "sostenibilità" e l'etichetta "architettura sostenibile" dilagano tra ingegneri, architetti e designer fondamentalmente per due ragioni: funzionali e formali. Lo scopo dell'architettura sostenibile è quello di andare a realizzare costruzioni a limitato impatto ambientale ponendosi come finalità progettuali l'efficienza energetica, il miglioramento della salute, del comfort e della qualità della fruizione degli abitanti. Fare architettura sostenibile significa saper costruire e gestire un'edilizia in grado di soddisfare al meglio i bisogni e le richieste dei committenti, tenendo conto già dalla fase progettuale delle risorse naturali, senza arrecare danno o disagio agli altri e all'ambiente, cercando quindi di inserirsi nel contesto armoniosamente e pensando anche ad un riuso totale dello spazio e dei materiali. Gli elementi fondamentali di cui bisogna tener conto nel processo progettuale prevedono l'orientamento, il soleggiamento e l'ombreggiamento prodotto dalle preesistenze, i fattori di ventilazione naturale ma anche l'adozione di sistemi alimentati da biomasse e gestione dell'energia rinnovabile, tutto ciò realizzato ed integrato con materiali studiati appositamente per interagire con l'ambiente. Il termine sostenibilità in architettura non è limitato solo al risparmio energetico o di riduzione dei consumi, piuttosto riguarda soprattutto un incrocio fondamentale ed intrinseco di fattori relativo alla nostra esistenza sul pianeta nella sua pienezza ed integrità. Un progetto ingegneristico o urbanistico efficiente in termini ambientali non fa riferimento solo alle scelte adottate ma in particolar modo dipende anche dai comportamenti che gli abitanti appartenenti ad un quartiere devono seguire per ridurre al minimo gli sprechi ed i consumi energetici in modo tale da rendere tutta la città ecosostenibile. Ad oggi molto spesso si vanno a definire come sostenibili quegli edifici che di sostenibile presentano, ad esempio, l'utilizzo di pannelli solari che risulta essere vantaggioso solo in termini di risparmio energetico, ma in realtà il termine sostenibilità deve essere inteso nel complesso delle sue parti che coinvolgono aspetti sia sociali che economici. L'abitudine di definire come sostenibili quegli edifici che non lo sono è diventato un fenomeno talmente tanto diffuso che è stato identificato col nome di Greenwashing. Uno degli obiettivi più importanti di chi si cimenta nell'architettura sostenibile è quello di riciclare per intero o quasi i prodotti dell'architettura. Alla luce di quanto detto è bene quindi andare a realizzare opere scomponibili con elementi e materiali che possono essere facilmente recuperati, riutilizzati e smaltiti senza provocare ulteriori inquinamenti ed andare così a ridurre l'utilizzo di materie prime. Realizzare edifici scomponibili e adattabili a nuovi usi diventa oggi una prerogativa che però ancora in pochi attuano. L'adozione di nuovi materiali ci ha riportati, in un certo senso, indietro; molto spesso si deve tener conto che un prodotto è caratterizzato da una vita e può assumere funzioni differenti e magari anche migliori di quelle per cui era stato concepito. Occorre quindi prendere in considerazione l'aspetto del riuso e del riciclaggio dei materiali sin dal momento della progettazione di un edificio ex novo e, nel caso di demolizioni, andare ad elaborare un piano di recupero che garantisca e faciliti il riuso e il riciclaggio dei vari elementi. Possiamo quindi

affermare che l'architettura sostenibile è più un approccio culturale che un ramo dell'architettura tradizionale, che spinge il progettista a costruire riducendo al minimo l'impatto delle opere sulla salute dell'uomo e sull'ambiente attraverso un limitato consumo di risorse non rinnovabili e l'utilizzo di materiali non nocivi al fine di salvaguardare il rapporto uomo-edificio-ambiente. Ciò che deve ancora avvenire è la rifondazione dei caratteri dell'architettura per rispondere ai problemi ambientali che ad oggi non possono essere trascurati. Purtroppo l'ambito edilizio non ha risposte immediate e mostra pienamente la difficoltà della trasformazione dei processi di assorbimento culturale che richiedono tempo e convinzione per apprendere i nuovi approcci per un'architettura priva di conseguenze negative per la vita degli esseri viventi e del pianeta.

Per cui per ottenere un'economia circolare nel settore edilizio è necessario un cambiamento nei modelli di business. Per far ciò si devono attivare strategie che aiutino a mantenere la qualità dei prodotti nel corso dell'intero ciclo di vita conosciute come "strategie sharing". Quest'ultime possono aumentare la durata di servizio di molti spazi ed aumentare l'effettivo utilizzo degli stessi. Inoltre nuovi modelli di business possono estendere la responsabilità del produttore lungo il ciclo di vita del prodotto e spostare l'attenzione al valore intrinseco del materiale a fine vita utile, che attualmente non viene considerato. Questo potrebbe attivare processi di riuso/riutilizzo e riciclo.

Esistono molti interessanti esempi di riutilizzo e riciclo di prodotti, di elementi tecnici e di edifici, in cui componenti e materiali vengono salvati dalla discarica per essere riciclati/reimpiegati in ambito architettonico. Per quanto riguarda *il riciclo di materiali da altri settori verso l'edilizia* possiamo citare ad esempio gli scarti del Tetra Pack, dal quale, un'azienda multinazionale, ricava plastica riciclata per realizzare i pali da ormeggio della laguna di Venezia, più resistenti di quelli tradizionali di legno. Un altro interessante esempio è legato ai rigenerati tessili che consiste nel promuovere, da parte di alcune aziende, campagne di recupero di rifiuti tessili post consumo che vengono poi utilizzati per realizzare pannelli isolanti di tipo termico e acustico. In generale, molti materiali isolanti hanno elevate percentuali di materiale riciclato, come ad esempio la lana di vetro, che è prodotta impiegando un'elevata percentuale di vetro riciclato proveniente da altro uso sul mercato, o gli isolanti a base polimerica, prodotti dal riciclo delle bottiglie di plastica. Un'importante fonte di materiali alternativi ai basalti ed alle miscele di ossidi, sono le scorie di provenienza dal ciclo di fabbricazione della ghisa (dall'altoforno) e dall'acciaio del forno elettrico. L'utilizzo delle loppe da altoforno come materia prima per la produzione dei cementi è ormai una tecnologia consolidata. Di più recente applicazione sono gli utilizzi dei materiali provenienti dal ciclo di fabbricazione dal forno elettrico. Le scorie da forno elettrico sono dei validi sostituti dei basalti per la produzione ad esempio di conglomerati bituminosi per manti stradali. La struttura del materiale rende queste strade addirittura più sicure (in termini di capacità di drenaggio acque, fonoassorbenza e presa del pneumatico) di quelle tradizionalmente fatte con i basalti. Ad esempio nel caso dell'utilizzo per pavimentazioni stradali la scoria è corredata da certificazione e marchio CE in conformità al Regolamento (UE) n. 305/2011 e secondo le norme: UNI EN 13043 (aggregati per conglomerati bituminosi), UNI EN 12620 (aggregati per conglomerati cementizi) e UNI EN13242 ("Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione delle strade"). Per quanto riguarda invece *il riciclo di materiali dal settore dell'edilizia verso altri settori* risulta essere più raro. Opportune strategie di scomposizione, adottate in fase di progettazione, congiuntamente ad attività di demolizione selettiva, possono consentire, al termine della vita utile degli edifici, di riciclare alcuni materiali da costruzione, che diventano risorsa per altri

settori. Per esempio il recupero e riciclo del legno può dar vita a nuovi prodotti, sia in ambito edilizio, come nel caso dei blocchi in legno-cemento, sia in settori diversi. Sebbene nell'industria produttiva dei polimeri sia consolidato il riciclaggio degli scarti di lavorazione non si può dire altrettanto del riciclo delle plastiche impiegate in edilizia, a causa delle difficoltà di separazione da materiali diversi. Anche in questo caso la progettazione del disassemblaggio riveste un ruolo chiave, sia in relazione al singolo prodotto, sia in relazione alle tecniche costruttive del sistema edificio. *Internamente al settore edilizio,* attualmente i rifiuti prodotti vengono prevalentemente utilizzati nel medesimo campo. I rifiuti derivanti dall'attività di costruzione e demolizione possono essere utilizzati senza alcuna trasformazione (utilizzo tal quale come sottofondi, riempimenti, drenaggi) o sottoposti a lavorazione per la produzione di prodotti finiti (es. misti granulari da rilevato) o di materiali costituenti di altri prodotti (es. calcestruzzi e conglomerati bituminosi). Più raro è il riutilizzo. Il reimpiego di elementi e componenti "in" edilizia e "per" l'edilizia ha alcuni vantaggi, tra cui quelli economici, legati al costo nullo o quasi nullo dei materiali recuperati, e quelli energetico-ambientali, legati da un lato alla riduzione della necessità di produrre nuovi materiali, dall'altro alla riduzione delle quantità di rifiuti destinati al riciclaggio (processo generalmente più energivoro del riuso), alla valorizzazione energetica o alla discarica. Tuttavia occorre sottolineare che i consumi energetici e i costi economici di un edificio, nonché il suo impatto ambientale, vanno valutati non solo in funzione della fase di costruzione ma del suo intero ciclo di vita. È importante dunque valutare attentamente le performance in esercizio che gli elementi e componenti riutilizzati possono garantire (prestazioni residue a confronto con i requisiti sempre più stringenti imposti dalle normative).

## 2.2 SOSTENIBILITA' IN AMBITO STRADALE.

Tutto questo si ripercuote nei diversi settori lavorativi, in particolar modo nell'ambito della costruzione stradale, dove la risposta alle necessità precedentemente elencate si è tradotta nell'utilizzo di tecniche di riciclaggio e tecniche che prevedono la produzione di materiali stradali a temperature più basse riducendo così l'utilizzo di materie prime, il rilascio di sostanze nocive nell'ambiente e un minor consumo di energia nella produzione. Ovviamente tutte queste innovazioni devono comunque garantire prodotti che presentano caratteristiche non inferiori di quelle ottenute con le tradizionali tecnologie, cioè non ci si deve dimenticare dell'efficienza e delle prestazioni richieste nelle pavimentazioni stradali.

## 2.3 TECNICHE DI RICICLAGGIO

Lo scopo del riciclaggio è quello di recuperare quanto più materiale possibile dal ripristino di pavimentazioni stradali esistenti. Tale materiale, detto RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), si ricava dalla rottura a blocchi o dalla fresatura degli strati superficiali, tramite appositi macchinari dette frese, con o senza il preriscaldamento della superficie. I risultati che si ottengono sono rappresentati da aggregati con elevato contenuto di materiale fine a seguito della demolizione stradale, rivestiti da un bitume invecchiato, ovvero che ha già subito processi di ossidazione a breve e lungo termine nel corso della vita utile della pavimentazione stradale. Tali caratteristiche possono andare ad alterare le proprietà del legante residuo presente nel RAP con ripercussioni sulle prestazioni della miscela risultante, infatti in fase preliminare di mix design, che poi di seguito vedremo, è importante tener conto di questi accorgimenti. Per quanto riguarda le tecniche di riciclaggio esse si suddividono sostanzialmente in:

- *Tecniche di riciclaggio a caldo*: il RAP viene aggiunto al bitume e all'aggregato vergine, questi ultimi preventivamente scaldati a circa 150°C per facilitare l'adesione al nuovo bitume, con una percentuale compresa tra il 10% ed il 50% all'atto di confezionamento della nuova miscela.

- *Tecniche di riciclaggio a freddo:* realizzato senza l'apporto di calore mediante attrezzature che consentono la miscelazione del fresato, per una quantità variabile tra l'80% ed il 100%, con legante, acqua ed eventuali inerti vergini.

**Figura 2.1 -** *Tecniche di riciclaggio*

In entrambi i casi si può ricorrere all'utilizzo sia di impianti fissi che mobili.

Nel primo caso il materiale viene trasportato dal luogo di prelievo all'impianto, inserito poi nel ciclo produttivo e di conseguenza riutilizzato. I materiali saranno sottoposti a processi preliminari di essiccazione e vagliatura, dopodiché seguono i processi di mescolamento che, a seconda della tecnica utilizzata, prevedono la distinzione degli impianti fissi in continui o discontinui: negli impianti continui gli aggregati vergini ed il fresato vengono stoccati separatamente e mediante saracinesche o alimentatori a nastro (che consentono la regolazione del flusso di ciascun aggregato) e vengono poi prelevati dai diversi silos. Il tutto verrà di seguito inviato ad un tamburo per poi raggiungere un miscelatore ad azione continua all'interno del quale si andrà ad inserire bitume, acqua e filler. Negli impianti fissi discontinui, invece, una volta eseguiti i processi preliminari, gli aggregati vengono miscelati tra loro e mescolati al bitume fino ad ottenere un impasto omogeneo; quest'ultimo verrà poi scaricato dal mescolatore.

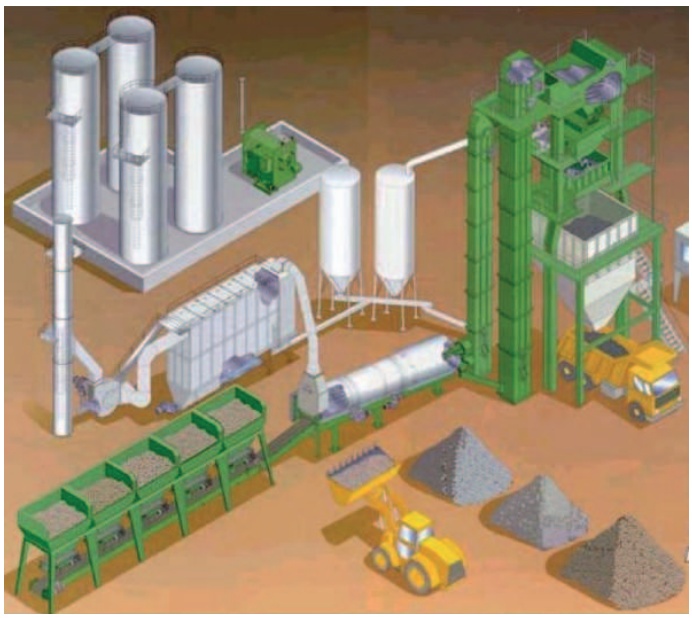

**Figura 2.2 -** *Impianto fisso discontinuo*

Nel secondo caso (di impianti mobili) il riciclaggio avviene direttamente in sito e richiede l'utilizzo di specifiche attrezzature e macchine. Queste ultime sono costituite da una fresatrice cilindrica con denti d'acciaio temprato che permette la disgregazione di elevati strati di pavimentazione e da una camera di miscelazione all'interno della quale possono essere iniettati gli agenti stabilizzanti durante l'operazione di fresatura che si andranno poi a mescolare ai materiali riciclati.

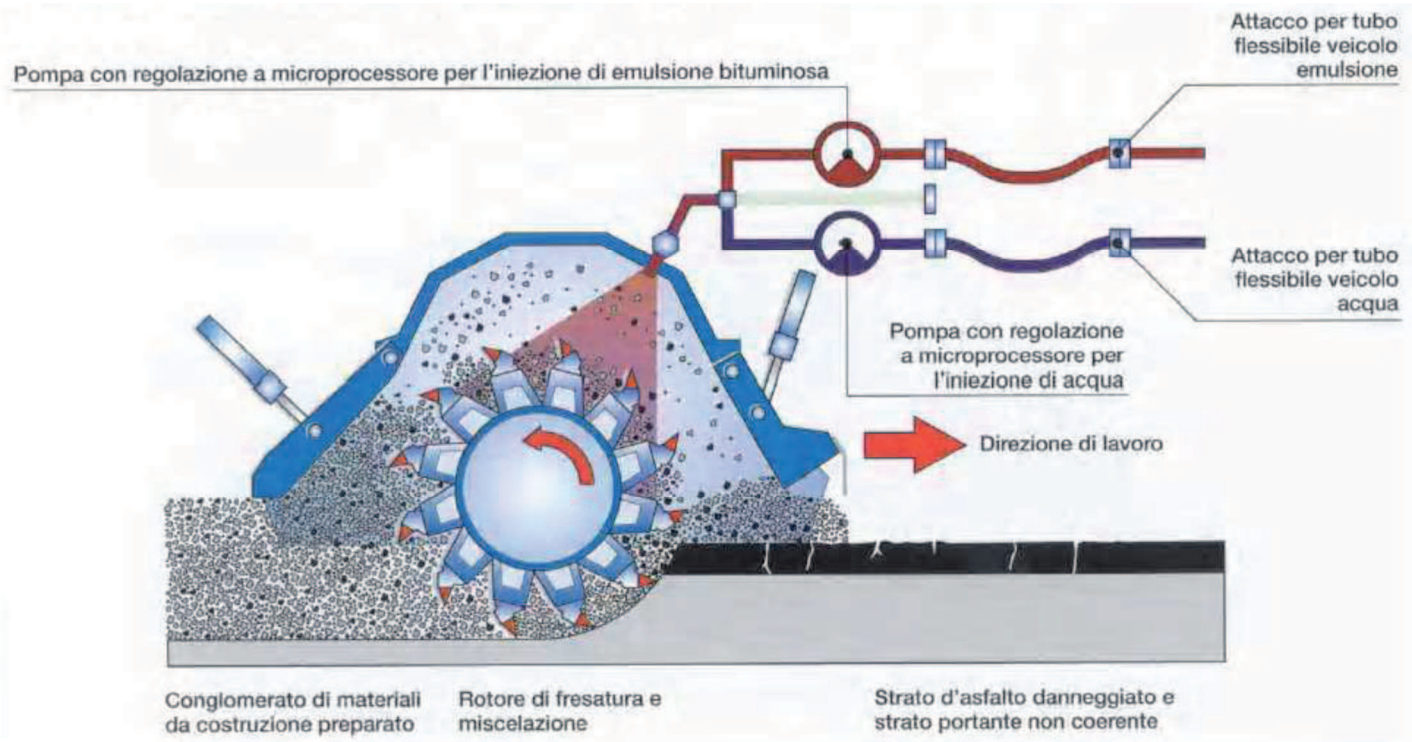


**Figura 2.3** – *Rotore del riciclaggio in sito*

## *2.4 TECNOLOGIE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI TIEPIDI (WMA)*

Un'altra soluzione, oltre a quella appena vista, è rappresentata dalla nascita delle tecnologie tiepide; queste consentono di ridurre le temperature operative andando ad esempio, oltre che a ridurre l'energia usata e le emissioni di gas, quindi a salvaguardare l'ambiente, anche a migliorare le condizioni di lavoro degli operai.

Queste tecnologie sono state sperimentate in Germania ed in Norvegia tra il 1995 ed il 1999.

Con WMA (Warm Mix Asphalt ovvero Miscela Bituminosa Tiepida) si intende una miscela realizzata attraverso processi produttivi che prevedono l'utilizzo di temperature inferiori di una decina di gradi rispetto alle tradizionali HMA (Hot Mix Asphalt ovvero Miscela Bituminosa Calda) tramite l'impiego degli stessi macchinari all'interno di impianti fissi o mobili. La finalità nella produzione di tali miscele è proprio quella di migliorare le caratteristiche chimico-fisiche dei bitumi in modo tale da ricavarne un legante che garantisca un'ottima lavorabilità in fase produttiva ma che allo stesso tempo possieda delle caratteristiche meccaniche adatte a sostenere gli sforzi indotti dai carichi veicolari a cui la pavimentazione stradale è sottoposta. Per cui i vantaggi eco-sostenibili che tale tecnologia possiede possono essere riassunti come segue:

- Risparmio energetico che si traduce in una riduzione del consumo di combustibile, risorsa non rinnovabile;
- Riduzione delle emissioni di fumi, gas e odori nell'ambiente sia nella fase di produzione che in quella di stesa;
- Riduzione dell'invecchiamento del bitume con la diminuzione delle temperature;
- Riduzione dei tempi di attesa per la riapertura della strada al traffico;
- Minor usura da parte dei macchinari impiegati prevalentemente causata dalle alte temperature;
- Migliori condizioni lavorative per gli operai del settore;
- Ampliamento dell'intervallo stagionale di stesa (essendo le temperature più basse, la procedura di stesa può essere fatta anche nei periodi freddi e nelle ore notturne)
- Eventuale aumento della distanza di trasporto a parità di temperatura finale.

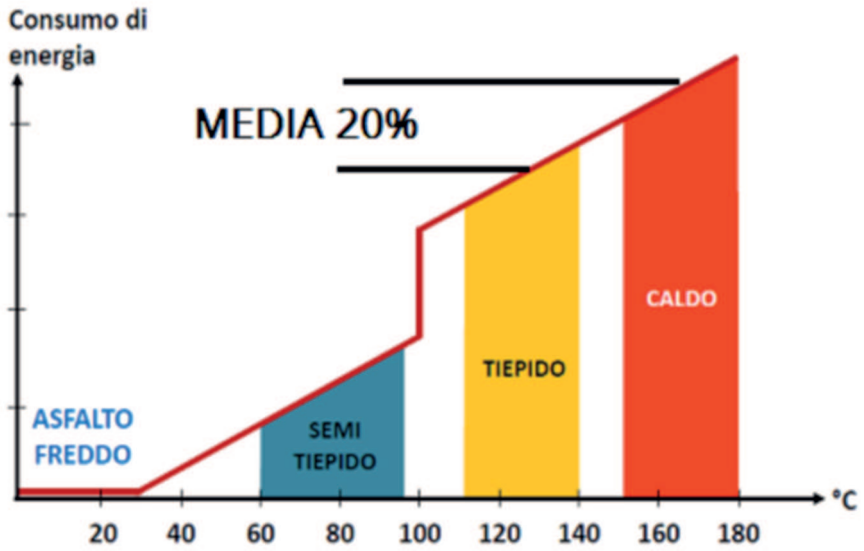


**Figura 2.4** – *Range delle temperature di lavorazione in funzione della tecnica scelta*

Il vantaggio più evidente è rappresentato dalla possibilità di utilizzare RAP per una quantità del 50% maggiore rispetto alle HMA (combinazione, quindi, delle tecniche di riciclaggio con le tecnologie Warm); questo, oltre a determinare una miglior lavorabilità permette una più bassa temperatura di produzione con un minor invecchiamento del legante e ciò contrasta con la maggior rigidezza legata al legante recuperato. Il suo utilizzo permette di compensare i costi iniziali dovuti alla necessità di attrezzare gli impianti per il processo di produzione dei conglomerati tiepidi, di conservare le risorse e di evitare problemi di smaltimento dei materiali. Inoltre consente un minor invecchiamento del legante e un allungamento della durata di vita della pavimentazione; tuttavia ad oggi non vi sono studi a lungo termine che ne confermino la veridicità. Un altro beneficio legato alla riduzione dei fumi e delle emissioni consiste nella possibilità di localizzare gli impianti di produzione nelle aree urbane o comunque dove sussistono controlli restrittivi sui gas prodotti.

Così come i vantaggi tali tecniche presentano anche degli svantaggi. Benché l'utilizzo di basse temperature porti ai benefici precedentemente citati, è anche vero che possa determinare una diminuzione delle prestazioni riguardo le aspettative. Data la novità di tale tecnica non si ha una risposta completa su questo punto di vista ma si può pensare che un bitume meno invecchiato possa attribuire al conglomerato una minor rigidezza rispetto a quella ottenuta dalle HMA.

Un altro ostacolo è rappresentato dalla modifica degli impianti soprattutto dipendente dal tipo di additivo utilizzato che ne contraddistingue le diverse tipologie di WMA; questo si potrà tradurre in un vantaggio nel momento in cui si riuscirà a reintegrare il capitale iniziale in termini di durabilità rispetto alle HMA.

Inoltre l'adozione di temperature più basse può determinare una maggior suscettibilità del conglomerato all'umidità dovuta soprattutto all'incompleta essiccazione dell'aggregato che può tradursi nel fenomeno dello stripping che si verifica quando, a causa dell'intrusione di acqua, il legame tra aggregato e bitume viene meno. Le conseguenze possono essere:

- Perdita di coesione data dalla presenza di umidità nell'interfaccia
- Perdita di coesione dettata dal rammollimento del legante.

Per far pronte a questi problemi si può pensare di utilizzare degli agenti detti anti-stripping.

Un ultimo svantaggio può essere rappresentato dall'utilizzo di additivi chimici che può comportare effetti negativi sull'ambiente, anche quest'aspetto è ancora sotto esame.

### *2.4.1 Tipologie di tecniche WMA*

Una delle modalità per la classificazione di questi conglomerati si basa sulla tecnologia utilizzata che a sua volta dipende dalle diverse varietà di additivi impiegati presenti sul mercato. Le tipologie maggiormente adottate sono:

1. Tecniche schiumanti, di una parte o della totalità del legante stesso (tramite aggiunta di zeoliti o schiumaggio meccanico)
2. Tecniche che prevedono l'aggiunta di additivi fluidificanti del bitume che a loro volta possono suddividersi in:
    - Organici (o cere)
    - Chimici

Per l'adeguamento alle nuove tecnologie, in alcuni casi, possono essere richieste modifiche agli impianti di produzione, come ad esempio l'aggiunta di alcuni strumenti soprattutto nell'utilizzo delle tecniche schiumanti, mentre nel caso di additivi chimici e organici non vengono apportate modifiche poiché questi vengono addizionati preliminarmente al bitume. Tali adeguamenti hanno comunque dei costi molto bassi rispetto ai benefici che tali tecniche presentano e le case produttrici forniscono dei kit appositi per l'adeguamento facili anche da installare.

#### *Tecniche con bitume schiumato*

Il processo di schiumatura consiste nell'andare ad aggiungere una prestabilita quantità d'acqua nel bitume caldo o durante la fase di miscelazione; questo si trasforma poi in vapore raggiungendo un'espansione in termini volumetrici di 15-20 volte. Ciò che si ottiene sono delle bolle rivestite da una pellicola di legante che prendono il nome di "bitume schiumato" che determina una riduzione della viscosità del legante stesso con conseguente facilità di rivestimento degli aggregati senza che questi vengano riscaldati.

Il quantitativo d'acqua da inserire (che è circa il 2% in peso rispetto al legante) deve essere sufficiente ad avviare il processo di schiumatura ma non deve essere eccessivo perché possono essere riscontrati problemi di adesione. È proprio per questo motivo che spesso vengono aggiunti

al legante agenti anti-stripping di una quantità pari allo 0,5% in peso del bitume, preliminarmente la fase di miscelazione.

Le caratteristiche del bitume schiumato, che forniscono una descrizione della stabilità della schiuma stessa e da cui dipende sia il tipo di legante usato che il processo di espansione adottato, sono descritte in termini di:

- Rapporto di espansione (rappresentato dal volume massimo raggiunto in fase di espansione e il volume finale ottenuto una volta che la schiuma si è dissipata)
- Tempo di semi-vita (tempo espresso in secondi impiegato dalla schiuma a ridursi dal volume massimo alla metà)

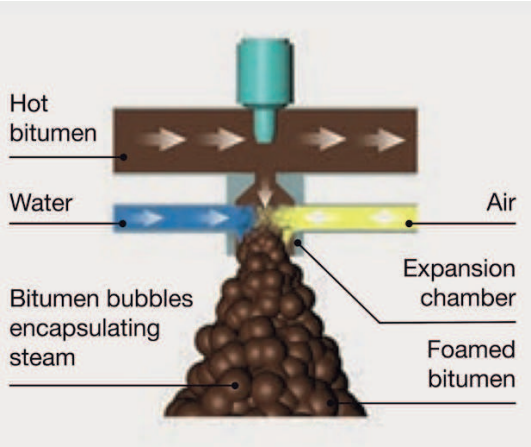


**Figura 2.5** – *Processo di schiumatura*

Tali tecniche risultano essere economiche e si differenziano tra loro in base alla modalità di aggiunta d'acqua, ovvero se questa viene aggiunta direttamente oppure indirettamente con l'utilizzo di sostanze che la contengono, dette zeoliti.

Le zeoliti possono essere naturali (di origine vulcanica o sedimentaria) oppure sintetiche (realizzate in base al contenuto d'acqua e l'intervallo termico di efficacia che si vuole avere).

In entrambi i casi queste sostanze si contraddistinguono per l'elevato contenuto di vuoti che permette di trattenere una quantità d'acqua fino al 20% del proprio peso. Le zeoliti vengono aggiunte direttamente nel miscelatore con una quantità di circa lo 0,3% sul peso del composto; esse a contatto con la miscela calda vengono sottoposte ad una temperatura compresa tra gli 85°C e 180°C liberando così vapore acqueo attraverso la formazione di micro-pori e avviando in tal modo un processo controllato e graduale di schiumatura del bitume. Il risultato ottenuto da tale processo presenta:

- Una diminuzione della viscosità del legante;
- Miglior lavorabilità della miscela a temperature più basse (di 30°C circa);
- Ottimo ricoprimento degli inerti;
- Una riduzione del consumo energetico e delle emissioni di gas nell'atmosfera grazie all'utilizzo di temperature inferiori rispetto alla tecnica tradizionale;
- Riduzione degli odori;
- Maggiore resistenza all'invecchiamento;

- Una superficie finita caratterizzata da maggiore elasticità e minor fragilità a seguito dell'utilizzo di frazione fine e dalla produzione a basse temperature.

Ciò che non si riesce a migliorare con l'uso delle zeoliti è la resistenza all'ormaiamento e del modulo resiliente (rapporto tra tensione applicata e deformazione recuperabile a seguito della rimozione del carico). Importante è tener conto dell'utilizzo di eventuali additivi che vadano a contrastare la suscettibilità all'acqua in quanto una minor temperatura di produzione può non assicurare la completa eliminazione di umidità dagli aggregati.

**Figura 2.6** – *Additivo zeolite*

## *Tecniche con aggiunta di additivi*

Gli **additivi organici** o cere rappresentano un'altra alternativa per la riduzione della temperatura di produzione dei conglomerati. Anch'essi, così come i processi di schiumatura, permettono di ridurre la temperatura di viscosità del legante che avviene quando la temperatura supera il punto di fusione delle cere. Durante il raffreddamento della miscela questi additivi solidificano assumendo dimensioni microscopiche e si distribuiscono in modo omogeneo nel composto conferendo rigidezza al legante.

Le cere sono catene di idrocarburi con un punto di fusione strettamente dipendente dalla lunghezza delle stesse ma comunque compreso tra gli 80°C e i 120°C. Esse vengono aggiunte in una quantità variabile tra il 2% ed il 4% del volume totale andando ad attribuire alla miscela un incremento della resistenza alla deformazione nonché la riduzione della temperatura di produzione di 20°C-30°C rispetto a quella tradizionale.

L'additivo in questione è disponibile sia in piccole palline, ideale per l'inserimento nel miscelatore, che in fiocchi per le aggiunte sfuse. Inoltre la tipologia di cera deve essere attentamente scelta per evitare qualsiasi tipo di inconveniente; più precisamente se la sua temperatura di fusione risulta essere più bassa della temperatura di servizio del conglomerato si va incontro ad importanti complicazioni.

I vantaggi dell'additivo in esame possono essere tradotti nella diminuzione della temperatura di produzione delle miscele e delle emissioni di fumi nell'ambiente andando ad ottimizzare i tempi di produzione.

Per rendere il composto più elastico alle basse temperature si può pensare di affiancare alle cere dei polimeri.

**Figura 2.7** – *Additivo organico o cera*

Sebbene gli additivi organici siano maggiormente presenti sul mercato ma soprattutto i più efficienti, spesso si ricorre all'utilizzo di una soluzione più economica rappresentata dagli **additivi chimici** che non richiedono nemmeno modifiche agli impianti di produzione. Questi, a differenza delle due tipologie precedentemente viste, non cambiano la viscosità del bitume, piuttosto agiscono sull'interfaccia microscopica tra aggregati e bitume, regolando e riducendo le forze di attrito in un range di temperature compreso tra gli 85°C ed i 145°C. In tal modo si va a migliorare la capacità di rivestimento degli aggregati da parte del legante con una temperatura di miscelazione e compattazione inferiori di 20°C-30°C rispetto alle tradizionali tecniche. L'additivo chimico è un composto liquido che viene aggiunto al bitume o durante la fase produttiva o direttamente nei serbatoi di stoccaggio con una percentuale compresa tra lo 0,3% e l'1,0% in peso sul bitume stesso. La resistenza di tale additivo alle alte temperature permette stoccaggi a medio-lungo periodo; inoltre esso mediante un'azione chimica, reagisce sulla struttura del legante che si ripercuote sulle caratteristiche fisiche del conglomerato e ne permettono il confezionamento di quest'ultimo ad una temperatura di 120°C e una stesa a 90°C.

L'innovazione di tale additivo consiste nel mantenere inalterate le proprietà chimico-fisiche del bitume, lasciando invariati penetrazione, viscosità e punto di rammollimento; queste proprietà verranno trasferite al conglomerato finito che presenterà le stesse qualità delle miscele tradizionali.

Come risultato della riduzione delle temperature di produzione si ha la limitazione dei consumi di combustibile, compresi dal 25% al 40%, e delle emissioni atmosferiche.

I sistemi WMA che utilizzano questo metodo, sono relativamente nuovi ed ancora in fase di studio, ma il loro sviluppo è promettente anche con l'utilizzo di piccoli quantitativi di additivo.

**Figura 2.8** – *Additivo chimico*

*Problematiche di miscele riciclate nel mix design*

Le motivazioni che hanno portato all'utilizzo di materiale riciclato in ambito stradale sono legate sia a motivi economici, come il costo dello smaltimento in discarica e del trasporto, che in termini di minor impatto ambientale. D'altra parte però questi aspetti non devono sostituire l'importanza della qualità del materiale che deve offrire prestazioni meccaniche simili, o se possibile migliori, di quelle ottenute da materiali vergini.

Uno dei metodi utilizzati per il rimpiego di fresato è la tecnica del riciclaggio a caldo che, oltre ad essere costituito da molti vantaggi, richiede anche particolare attenzione in fase di mix design e preparazione della miscela al fine di evitare eventuali complicazioni connesse a tale procedura.

Una delle problematiche che presenta un conglomerato bituminoso contenente una certa percentuale di fresato è rappresentata dall'interazione tra materiale vergine e materiale riciclato in termini di distribuzione granulometrica e comportamento del bitume invecchiato nei confronti di quello vergine. Difatti la curva granulometrica viene modificata in base al quantitativo di fresato che si andrà ad utilizzare poiché quest'ultimo è caratterizzato da un contenuto di materiale fine maggiore rispetto agli aggregati vergini. Inoltre la precisione di tale curva non sarà massima in quanto, a seguito della miscelazione che avviene ad alte temperature, il bitume invecchiato tenderà a riattivarsi modificando la granulometria degli inerti e andando così a mescolarsi con il legante vergine. A seguito dei processi che il bitume invecchiato ha subito nel tempo, esso presenta una rigidezza maggiore rispetto a quello vergine; per di più in base alle caratteristiche che una pavimentazione stradale possiede, il bitume è caratterizzato da un certo grado di invecchiamento che tenderà a cambiare durante le fasi di produzione del conglomerato riciclato a seguito delle elevate temperature alle quali sarà sottoposto.

Inoltre è bene tener presente che il quantitativo di legante aggiunto con l'utilizzo di RAP dipende prevalentemente dal contenuto di fino che esso presenta; infatti, essendo il materiale fino costituito da una superficie specifica maggiore rispetto all'aggregato grosso, il bitume residuo sarà maggiore.

La qualità della miscela finale risulta essere dipendente dalla:

- Divisione o meno del fresato in diverse pezzature granulometriche
- Provenienza dello stesso

Infatti, siccome il RAP può derivare dalla fresatura di diversi strati della pavimentazione, i materiali che lo contengono presenteranno caratteristiche differenti in base alle esigenze richieste nello strato in cui erano stati impiegati; è proprio per questo motivo che per avere chiare le prestazioni che il RAP può offrire e quindi adottare un suo giusto rimpiego è buona norma possedere diverse distribuzioni granulometriche accompagnate da differenti provenienze. Questa non risulta essere una novità in quanto alcuni Paesi permettono l'utilizzo di RAP soltanto se proveniente da specifici progetti in modo tale da poter analizzare con certezza le caratteristiche del fresato utilizzato.

Un'altra problematica è dettata dalla scelta del bitume vergine da utilizzare che sia compatibile con quello invecchiato. Solitamente al giorno d'oggi vengono utilizzati bitumi modificati tramite l'aggiunta di polimeri che attraverso la loro struttura reticolata inglobano la fase bituminosa andando a modificare le caratteristiche del bitume di base. I vantaggi che i bitumi modificati presentano rispetto ai tradizionali posso essere riassunti come segue:

- ✓ Maggior resistenza alle deformazioni permanenti e minor fragilità alle basse temperature;
- ✓ Incremento delle resistenze e della capacità di allungamento sotto l'azione di forze ripetute che si traduce in un miglioramento del comportamento a fatica;
- ✓ Maggior consistenza del bitume alle alte temperature;
- ✓ Migliore resistenza all'invecchiamento e alle aggressioni dovute agli agenti chimici;
- ✓ Miglior adesione e coesione con l'aggregato.

Per cui questi vantaggi possono andare a compensare eventuali problematiche date dall'utilizzo di materiale riciclato. Inoltre se quest'ultimo, nel momento della miscelazione ad alte temperature, non viene sufficientemente riscaldato, il bitume invecchiato non riuscirà a riattivarsi e di conseguenza a mescolarsi con quello vergine; ciò comporterà una variazione del contenuto di bitume e della granulometria stabiliti preliminarmente nel mix design con conseguenti ripercussioni negative sulle prestazioni di messa in opera ed esercizio del conglomerato. Per cui l'adozione di fresato può essere fatta a patto che venga individuata una curva granulometrica soddisfacente ed i bitumi vergini siano ben selezionati. Possiamo quindi concludere che lo studio preliminare della miscela deve essere eseguito con particolare attenzione sulle caratteristiche dei materiali impiegati così come sulle loro quantità in fase di mix design.

### *2.4.2 Benefici della tecnologia WMA*

Possiamo riassumere in termini di benefici quanto detto nei paragrafi precedenti riguardo la tecnologia WMA senza dimenticare degli svantaggi che comunque essa presenta. Una classificazione generale può essere la seguente:

1. Benefici ambientali
2. Benefici economici
3. Benefici nella produzione
4. Benefici nella lavorazione della miscela

1. Per quanto riguarda i benefici ambientali, secondo uno studio fatto in Germania, le emissioni di gas risultano essere strettamente dipendenti dalla temperatura di lavorazione dei materiali, che al di sotto degli 80°C possono ritenersi nulle. Inoltre le riduzioni di $CO_2$ sono dell'ordine del 20-40% mentre quelle di $SO_2$ intorno al 20-35%. Per quanto riguarda invece i composti organici volatili (VOC) si può arrivare ad una riduzione fino al 50%, per il monossido di carbonio (CO) dal 10% al 30% e per gli ossidi di azoto ($NO_X$) fino al 70%.
   Questi aspetti oltre ad essere importanti ai fini della salvaguardia ambientale, lo sono anche per le migliori condizioni di lavoro degli operai del settore.
2. Per quanto riguarda l'aspetto economico, questo tiene conto soprattutto della tipologia e del costo dell'energia utilizzata che può assumere prezzi differenti nei diversi Paesi. Si è comunque riscontrata una riduzione del consumo di energia di circa il 60-80% rispetto alle tradizionali HMA; questo va poi confrontato con i costi necessari alla modifica degli impianti ed in una prospettiva futura per quanto riguarda l'efficienza, la durabilità e il prezzo che assumerà l'energia (tanto più sarà maggiore, più il risparmio sarà notevole).
3. Nei benefici della produzione si fa riferimento in particolar modo all'uso di RAP che determina una riduzione dell'utilizzo di materie prime (conservazione di risorse naturali), evita problemi di smaltimento ed aiuta a compensare i costi iniziali per l'azienda.

4. Nell’ambito della lavorazione, invece, con la modifica della viscosità della miscela si va ad ottimizzare la lavorabilità e la compattazione per cui lo sforzo energetico in fase di produzione sarà minore. Inoltre la stesa della miscela può essere prolungata anche nei periodi più freddi e le distanze di trasporto del conglomerato possono essere aumentate rispetto a quanto previsto per le HMA. Un altro aspetto da non sottovalutare è legato alla tempistica di riapertura della strada al traffico veicolare che risulta essere ridotta.

# *Capitolo 3 - Indagine sperimentale e materiali utilizzati*

Nel seguente capitolo vengono riportate le fasi operative realizzate nell'indagine sperimentale presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura", il programma sperimentale seguito e sua organizzazione, la scelta e la preparazione dei materiali impiegati, il confezionamento dei provini ed infine le prove effettuate su quest'ultimi.

## *3.1 PROGRAMMA SPERIMENTALE*

Il presente lavoro di ricerca si pone come obiettivo il confronto prestazionale tra due miscele bituminose di tipo "tiepido" ed una miscela di tipo tradizionale, impiegate per strati di usura nelle pavimentazioni stradali. Nello specifico le due miscele prodotte mediante tecnologie WMA prevedono l'impiego di due diverse percentuali di RAP, mentre la miscela di riferimento prodotta mediante tecnica a caldo contiene anch'essa fresato stradale ma in quantità ridotta rispetto alle miscele WMA. La caratterizzazione prestazionale delle miscele si baserà sull'esecuzione di prove dinamiche per la determinazione del modulo di rigidezza e della resistenza a fatica, mediante l'impiego dell'apparecchiatura NAT (*Nottingham Asphalt Test*).

L'utilizzo di temperature più basse, di un maggior contenuto di RAP e l'aggiunta di additivi in fase di produzione del conglomerato, modificano le proprietà meccaniche di quest'ultimo; pertanto si vuole andare a studiare in che misura le proprietà vengono modificate e le differenze presentate rispetto ai conglomerati bituminosi tradizionali. Il confronto prestazionale permetterà dunque di valutare l'efficacia della tecnologia WMA per la produzione di miscele bituminose riciclate e contestualmente la possibilità di impiegare maggiori quantità di RAP rispetto alle attuali pratiche costruttive.

## *3.2 ORGANIZZAZIONE SPERIMENTALE*

La seguente sperimentazione è stata organizzata in fasi consecutive:

- ✓ Fase 1: preparazione miscele e provini;
- ✓ Fase 2: esecuzione delle prove di modulo ad una frequenza di 2 Hz e alla temperatura di 20°C;
- ✓ Fase 3: esecuzione delle prove di accumulo di deformazione permanente alla temperatura di 20°C;
- ✓ Fase 4: elaborazione ed analisi dei dati.

## *3.3 I MATERIALI*

Il conglomerato bituminoso è una miscela costituita da una fase solida rappresentata da aggregati granulari e da una fase legante, il bitume, che può essere modificata con aggiunta di additivi che permettono di ottenere la stessa lavorabilità di un conglomerato realizzato tramite la tecnologia tradizionale. Quindi, per ottenere una miscela che abbia determinate caratteristiche in termini di proprietà fisiche e meccaniche e che possa garantire un comportamento omogeneo durante la vita utile della pavimentazione stradale, è necessario definire con precisione i vari elementi costituenti ed ottenere dei rapporti proporzionali tra di essi che siano ottimali.

### *3.3.1 Il bitume tradizionale*

Il bitume è una miscela di idrocarburi di origine naturale o artificiale, derivante cioè dalla raffinazione del petrolio, e pertanto fortemente dipendente dalla natura di quest'ultimo, costituito

da frazioni di grassi saturi, aromatici, resine ed altri che ne caratterizzano le proprietà reologiche. In questa sperimentazione è stato utilizzato un bitume 50/70, le cui caratteristiche sono presentate in tabella (Tabella 3.1).

| Descrizione prova | Prestazione | | Norme di riferimento | Specifica tecnica armonizzata |
|---|---|---|---|---|
| | Unità di misura | Valore dichiarato | | |
| Valore della penetrazione | 0,1 mm | 50-70 | UNI EN 1426 | UNI EN 12591: 2009 Bitumi per Applicazioni Stradali |
| Punto di rammollimento | °C | 46-54 | UNI EN 1427 | |
| Resistenza all'indurimento | | | UNI EN 12607-1 | |
| Variazione della massa (valore assoluto) | % | ≤ 0,5 | | |
| Penetrazione dopo indurimento | % | ≥ 50 | UNI EN 1426 | |
| Variazione del punto di rammollimento | °C | ≤ 11 | UNI EN 1427 | |
| Punto di infiammabilità | °C | ≥ 230 | UNI EN ISO 2592 | |
| Solubilità | % | ≥ 99,0 | UNI EN 12592 | |
| Punto di rottura Fraas | °C | ≤ -8 | UNI EN 12593 | |
| Dipendenza della consistenza dalla temperatura | | NPD | | |
| Rilascio di sostanze pericolose regolamentate | | NPD | | |

**Tabella 3.1** – *Caratteristiche bitume 50/70*

La scelta degli additivi da aggiungere al bitume e la modalità di miscelazione permettono di ottenere dei conglomerati bituminosi con caratteristiche differenti.
La procedura di preparazione delle tre diverse tipologie di conglomerato bituminoso risulta essere diversa l'una dall'altra; in tutti e tre i casi il bitume deve essere preliminarmente riscaldato ad una temperatura di 160°C circa dalle 2 alle 3 ore fino ad ottenere un fluido viscoso, al quale deve essere poi aggiunto l'additivo (nel caso delle due miscele non tradizionali).

### *3.3.2 Gli aggregati vergini*

Per quanto riguarda gli aggregati utilizzati nella miscela, la distribuzione della dimensione dei granuli e il fuso granulometrico, vengono studiati preliminarmente con particolare cura e attenzione poiché condizionano molto le proprietà ingegneristiche del conglomerato. Essi, così come tutti i materiali da costruzione, sono soggetti alla normativa vigente ed alla marcatura CE che garantisce la conformità dei requisiti di tali materiali.

La norma UNI EN 13043 stabilisce innanzitutto requisiti geometrici:

- Dimensioni: tutti gli aggregati sono designati dalla scrittura d/D, se la dimensione massima D è troppo grande allora la miscela risulta essere poco lavorabile, al contrario invece gli aggregati non sviluppano attrito adeguato dando vita ad una miscela poco stabile. Inoltre deve essere valutata l'entità della parte fina e del filler visto che evitano il trasudamento e aumentano la stabilità;

- Granulometria: la normativa stabilisce le tolleranze per quanto riguarda i passanti ai vari setacci, questo dà origine ad un fuso granulometrico in cui la curva della nostra miscela di aggregati deve essere contenuta obbligatoriamente;
- Tessitura superficiale: importante per le asperità superficiali che influenzano l'aderenza;
- Forma dei granuli: determinano le tendenze degli aggregati, come la facilità di compattazione e lo sviluppo di attrito interno elevato.

Requisiti fisici:

- Qualità e pulizia dei fini: eliminare eventuali impurità o residui argillosi;
- Massa volumica dei granuli e assorbimento dell'acqua;
- Resistenza alla frammentazione: determinata tramite la prova Los Angeles e rappresentata dal coefficiente di Los Angeles. Più questo è alto, più il materiale è frantumabile;
- Resistenza all'usura: capacità di un materiale di mantenere una certa rugosità nella tessitura superficiale. Si determina con la Prova CPA;
- Resistenza alla levigazione: si determina con prove di attrito;
- Resistenza al gelo-disgelo: si determina tramite Prova Los Angeles dopo che il materiale è stato sottoposto a dei cicli di gelo-disgelo.

Requisiti chimici:

1. Presenza di minerali nocivi, sostanze solubili in acqua come gesso o solfati e sostanze che modificano i meccanismi di presa del legante: vengono valutati tramite analisi chimica e petrografica seguendo le procedure dettate dalla normativa.

In questa sperimentazione si è fatto uso di aggregati calcarei e basaltici con quattro pezzature come già precedentemente detto: 8/14, 4/8, 7/12, 0/2 e filler.

**Figura 3.2** - *Sabbia calcarea 0/2*

**Figura 3.3** - *Graniglia calcarea 7/12*

**Figura 3.1** - *Graniglia basaltica 4/8*

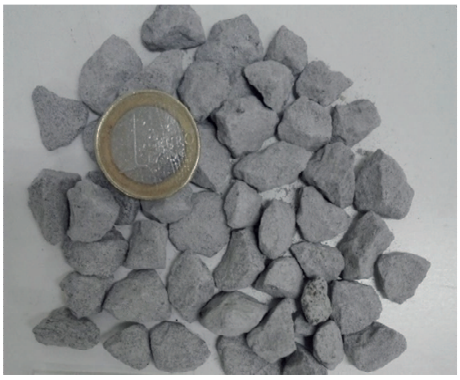

**Figura 3.4** - *Graniglia basaltica 8/14*

**Figura 3.5** – *Filler calcareo*

Di seguito vengono riportate le curve granulometriche delle diverse frazioni granulometriche (Tabella 3.2 e Figura 3.6).

| Setacci [mm] | Graniglia basaltica 8/14 | Graniglia basaltica 4/8 | Graniglia calcarea 7/12 | Sabbia calcarea 0/2 | Filler calcareo |
|---|---|---|---|---|---|
| | Passante [%] | Passante [%] | Passante [%] | Passante [%] | Passante [%] |
| 31,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 20 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 16 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 12,5 | 80,4 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 10 | 24,8 | 97,9 | 99,5 | 100 | 100 |
| 8 | 2,7 | 81,2 | 88,3 | 100 | 100 |
| 6,35 | 1 | 50,7 | / | / | / |
| 4 | 0,7 | 7,1 | 60,1 | 100 | 100 |
| 2 | 0,7 | 2,3 | 2,35 | 84,6 | 100 |
| 1 | 0,7 | 2 | 2,35 | 49,5 | 99,9 |
| 0,5 | 0,7 | 1,8 | 2,35 | 27,4 | 98,4 |
| 0,25 | 0,7 | 1,7 | 2,35 | 16,7 | 95 |
| 0,125 | 0,7 | 1,6 | 2,35 | 8,6 | 87,5 |
| 0,063 | 0,36 | 1,1 | 2,3 | 3,3 | 77,25 |

**Tabella 3.2** - *Granulometrie aggregati vergini*

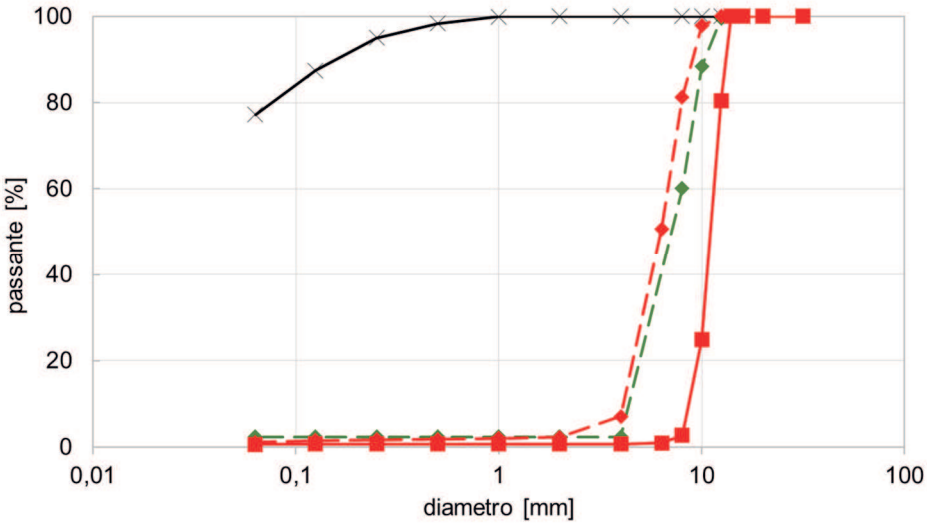


**Figura 3.6** - *Curve granulometriche aggregati*

### *3.3.3 RAP*

Il fresato deriva da opere di frantumazione di strati ammalorati di vecchie pavimentazioni giunte al termine della loro vita utile e che necessitano di interventi di manutenzione. In questa sperimentazione sono state utilizzate due tipologie di fresato fine, la frazione 0/5 di tipo non modificato in quanto proveniente dalla fresatura di conglomerati bituminosi non modificati e la frazione 0/5 di tipo misto. Le figure seguenti mostrano le due categorie a disposizione, le varie frazioni e le rispettive curve granulometriche:

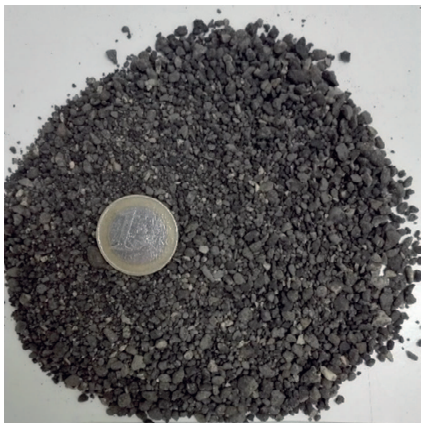

**Figura 3.7** - *RAP 0/5 non modificato*

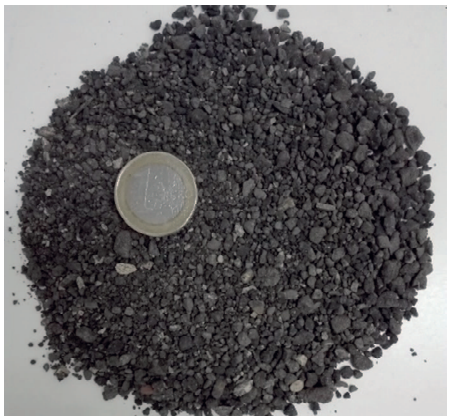

**Figura 3.8** - *RAP 0/5 misto*

| Setacci [mm] | Passanti [%] | |
|---|---|---|
| | RAP 0/5 attuale | RAP 0/5 non modificato |
| 31,5 | 100 | 100 |
| 20 | 100 | 100 |
| 16 | 100 | 100 |
| 12,5 | 100 | 100 |
| 10 | 100 | 100 |
| 8 | 100 | 100 |
| 4 | 98,7 | 99,2 |
| 2 | 73,2 | 78,1 |
| 1 | 43,6 | 48,9 |
| 0,5 | 31 | 30,2 |
| 0,25 | 23,2 | 20,6 |
| 0,125 | 13,8 | 14,2 |
| 0,063 | 10,5 | 8,1 |

**Tabella 3.3** - *Granulometrie RAP impiegato*

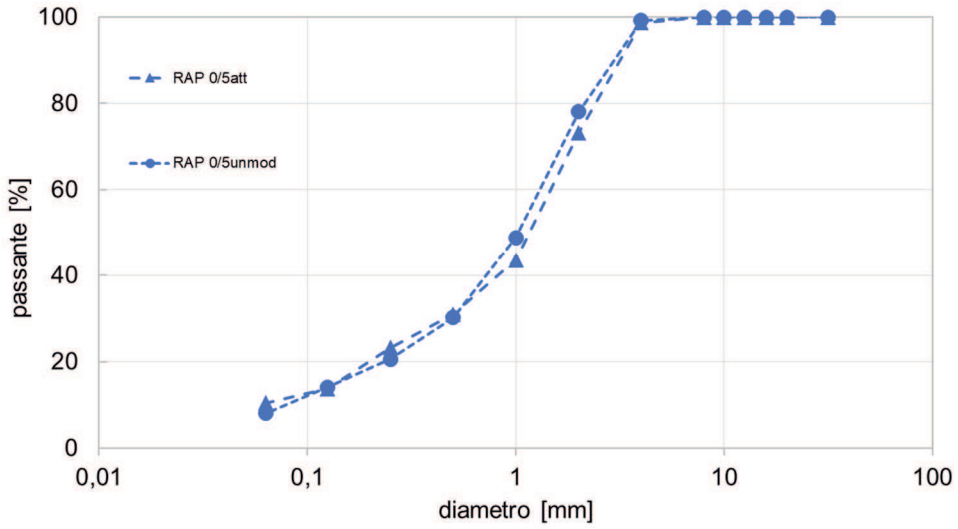


**Figura 3.9** - *Curva granulometrica RAP impiegato*

Al fine di determinare la curva granulometrica ottimale per ciascuna miscela oggetto di studio, le diverse pezzature sono state combinate e dunque sono state definite le percentuali in peso ottimali di ciascuna pezzatura in modo che la curva granulometrica finale ricadesse all'interno del fuso granulometrico fornito dal Capitolato Speciale d'Appalto della Provincia di Macerata specifico per strati di usura.

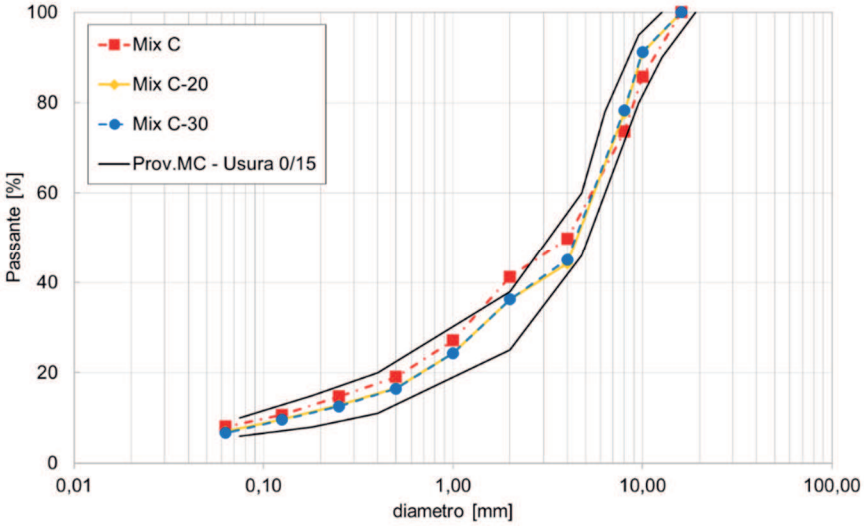


**Figura 3.10** - *Fuso e curva granulometrica*

### *3.3.4 Additivo*

L'additivo utilizzato esclusivamente nelle miscele tiepide è un additivo polifunzionale a formulazione complessa per il riutilizzo di percentuali variabili di fresato a base di alchil-ammido poliammine.
Le percentuali di dosaggio variano in funzione delle condizioni di lavoro, del tipo di materiale fresato impiegato, della temperatura del fresato e dell'umidità in esso contenuta, e del tipo di bitume nuovo utilizzato. L'additivo sarà aggiunto al bitume preliminarmente alla fase di miscelazione andando a moltiplicare il valore riportato nella ricetta della miscela per il quantitativo di bitume disponibile nel barattolo. Nella seguente tabella vengono riportate le caratteristiche fisico-chimiche dell'additivo in questione.

| | |
|---|---|
| Aspetto a 25°C | Liquido |
| Colore | Scuro |
| pH | N.A. |
| Densità a 25°C | ~ 940 Kg/m$^3$ |
| Viscosità a 25°C | ~150 cP |
| Flash point | >150°C |

**Tabella 3.4** - *Caratteristiche fisico-chimiche additivo*

Tale additivo permette il riutilizzo di materiale fresato e contemporaneamente la riduzione delle temperature di confezionamento, stesa e compattazione dei conglomerati bituminosi. La sua polivalenza consente di:

1) Rigenerare il vecchio bitume contenuto dal materiale fresato;
2) Promuovere uno stretto legame di adesione del bitume agli inerti;
3) Migliorare la lavorabilità, la stesa e la compattazione a più basse temperature rispetto a quelle utilizzate tradizionalmente.

## *3.4 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI*

Nel seguente paragrafo si andranno a definire le fasi e le relative apparecchiature utilizzate per la realizzazione dei provini.
Innanzitutto una volta preparati i diversi quantitativi di materiali definiti dalla ricetta si procederà nell'esecuzione di due fasi:

1. Miscelazione
2. Compattazione

**Miscelazione**

Per quanto riguarda la prima fase, questa verrà realizzata mediante l'utilizzo di un miscelatore (Figura 3.11) che verrà preliminarmente acceso e impostato alla temperatura alla quale dovrà avvenire la miscelazione in base alla tipologia di conglomerato bituminoso che si dovrà produrre. Precedentemente la fase di miscelazione, gli aggregati vengono inseriti in forno per 3h alla temperatura stabilita dalla ricetta del conglomerato, mentre il RAP soltanto 10min prima della miscelazione.

Una volta che il miscelatore ha raggiunto la temperatura impostata, si procederà all'inserimento nel suo interno di aggregati, escluso il filler che verrà inserito in seguito (Figura 3.12).

Dopo una prima miscelazione degli aggregati, si procederà all'inserimento del quantitativo di bitume opportunamente stabilito dalla ricetta che si deve realizzare (Figura 3.13).

Una volta inserito il bitume si farà miscelare il tutto ottenendo una miscela di aggregati e legante (Figura 3.14).

Infine si andrà poi ad aggiungere il filler e si procederà nuovamente alla miscelazione. La scelta di non inserire il filler insieme agli altri aggregati sin dall'inizio è dettata dal fatto che esso porterebbe alla formazione di grumi in seguito all'inserimento di bitume che non mi permettono la dispersione del legante su tutta la miscela in modo omogeneo (Figura 3.15).

Il prodotto che andremo poi ad ottenere a miscelazione completata sarà un materiale rappresentato nelle seguenti figure mostrate di seguito, che verrà poi vuotato in un contenitore (Figure 3.16 – 3.17).

Una volta ottenuto il conglomerato desiderato, lo si andrà a suddividere in diverse porzioni attraverso l'utilizzo di una bilancia in base al peso che i diversi provini che si dovranno realizzare, devono assumere (Figura 3.18).

**Figura 3.11** - *Miscelatore*

**Figura 3.12** - *Inserimento aggregati nel miscelatore*

**Figura 3.13** - *Inserimento nel miscelatore del bitume*

**Figura 3.14** - *Miscela ottenuta*

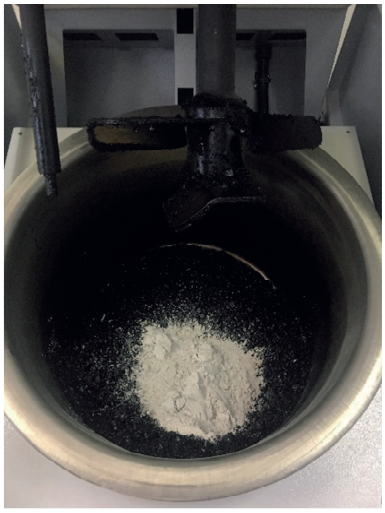

**Figura 3.15** - *Inserimento filler nella miscela*

**Figura 3.16** - *Miscela finale ottenuta*

**Figura 3.17** - *Scarico della miscela per realizzazione provini*

**Figura 3.18** - *Divisione del materiale in un contenitore*

**Compattazione**

Le varie porzioni di materiale vengono poi inserite all'interno del forno per 1h circa alle temperature di compattazione definite all'interno della ricetta che differiscono in base alla tipologia di conglomerato bituminoso che si sta realizzando.

In seguito si passa poi alla compattazione del materiale inserito in apposite fustelle (di dimensioni dipendenti da quelle del provino che dovrà essere realizzato) che avviene tramite inserimento di queste all'interno di una pressa giratoria (Figure 3.19-3.20).

Al temine di tale fase si ottengono provini aventi diametro pari a 100mm e altezza assunta circa pari a 55mm dopo aver subito 180 rotazioni nella pressa giratoria, sui quali verranno realizzate le seguenti prove.

**Figura 3.19** - *Pressa giratoria*

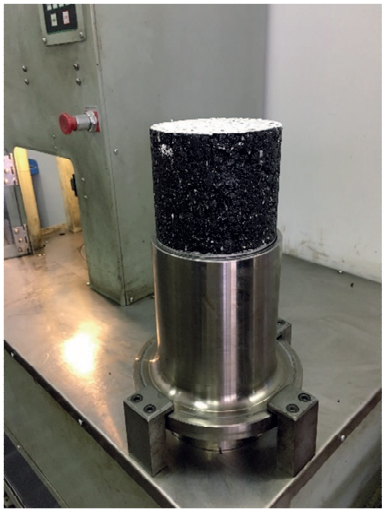

**Figura 3.20** - *Provino ottenuto*

## 3.5 NOMENCLATURA DEI PROVINI

Le famiglie di conglomerato bituminoso utilizzate in questa sperimentazione sono circa tutte caratterizzate dalla stessa curva granulometrica, composta da aggregati di quattro diverse pezzature (7/12, 8/14, 4/8 e 0/2 mm), e differiscono tra di loro per il diverso contenuto di RAP e bitume e nella tecnica di realizzazione della miscela. Il codice identificativo di ciascuna miscela è rappresentato da αβ-γγ-δδ dove: α è la tipologia di miscela, β è il tipo di additivo, γγ è la percentuale di RAP ed infine δδ è la percentuale di bitume.
Pertanto, sulla base di quanto appena detto, si può andare a definire tre famiglie di conglomerato bituminoso:

- C0-15 (REF): conglomerato bituminoso confezionato con bitume 50/70 senza aggiunta di additivi, quindi realizzato tramite tecnica tradizionale;
- C2-30-3.4: conglomerato bituminoso confezionato con bitume 50/70 con aggiunta di additivo e realizzato tramite tecnica WMA;
- C2-20-4.1: conglomerato bituminoso confezionato con bitume 50/70 con aggiunta di additivo e realizzato mediante tecnica WMA.

Per ciascuna ricetta che si andrà a realizzare si prevede la distinzione di tre categorie di provini che si differenziano dalle dimensioni del diametro, dalle masse e dalla modalità di realizzazione, cioè se vengono prodotti ad altezza imposta o a rotazioni imposte. Per cui, da quanto appena detto, si vanno a riportare di seguito le ricette delle miscele a cui si fa riferimento:

| MIX C0-15 (REF) | | |
|---|---|---|
| | TAPPETO 0/15 RAP | |
| | RAP 0/5 attuale = 13,9% | |
| | g | % |
| GRANIGLIA 7/12 | 6345 | 23,5 |
| GRANIGLIA BASALTICA 8/14 | 4050 | 15 |
| GRANIGLIA BASALTICA 4/8 | 3537 | 13,1 |
| SABBIA 0/2 | 7614 | 28,2 |
| FILLER | 1701 | 6,3 |
| RAP 0/5 attuale | 1215 | 13,9 |
| TOTALE | 27000 | 100 |

**Tabella 3.5** - Ricetta MIX C0-15 (REF)

BITUME TRADIZIONALE = 1215 g (NO ADDITIVO)

- Massa provino di diametro pari a 100mm e 180 rotazioni = 1005 g (8/9 provini)

1. Aggregati in forno per 3h a T=160°C
2. Bitume in forno per 2h a T=160°C
3. Temperatura di miscelazione = 160°C
4. Temperatura di compattazione = 150°C

| MIX C2-30-3,4 | | |
|---|---|---|
| | TAPPETO 0/15 RAP | |
| | RAP 0/5 unmod = 30% | |
| | g | % |
| GRANIGLIA 7/12 | 7020 | 26 |
| GRANIGLIA BASALTICA 8/14 | 1890 | 7 |
| GRANIGLIA BASALTICA 4/8 | 6480 | 24 |
| SABBIA 0/2 | 2430 | 9 |
| FILLER | 1080 | 4 |
| RAP 0/5 unmod | 8100 | 30 |
| TOTALE | 27000 | 100 |

**Tabella 3.6** – *Ricetta MIX C2-30-3.4*

BITUME TRADIZIONALE = 918 g

ADDITIVO = moltiplicare per 0,0088 per il quantitativo di bitume disponibile nel barattolo.

- Massa provino di diametro pari a 100mm e 180 rotazioni = 1000 g (8/9 provini)

1. Aggregati in forno per 3h a T=120°C
2. Bitume in forno per 2h a T=160°C
3. Temperatura di miscelazione = 120°C
4. Temperatura di compattazione = 110°C

| MIX C2-20-4,1 | | |
|---|---|---|
| | TAPPETO 0/15 RAP | |
| | RAP 0/5 unmod = 20% | |
| | g | % |
| GRANIGLIA 7/12 | 7560 | 28 |
| GRANIGLIA BASALTICA 8/14 | 1890 | 7 |
| GRANIGLIA BASALTICA 4/8 | 6210 | 23 |
| SABBIA 0/2 | 4590 | 17 |
| FILLER | 1350 | 5 |
| RAP 0/5 unmod | 5400 | 20 |
| TOTALE | 27000 | 100 |

**Tabella 3.7** – *Ricetta MIX C2-20-4.1*

BITUME TRADIZIONALE = 1107 g

ADDITIVO = moltiplicare per 0,0049 per il quantitativo di bitume disponibile nel barattolo.

- Massa provino di diametro pari a 100mm e 180 rotazioni = 1000 g (8/9 provini)

1. Aggregati in forno per 3h a T=120°C
2. Bitume in forno per 2h a T=160°C
3. Temperatura di miscelazione = 120°C
4. Temperatura di compattazione = 110°C

**Figura 3.21** - *Provini ottenuti*

Una volta ottenuti i diversi provini, si andrà, per ciascuno di essi, a misurare tramite un calibro le dimensioni effettive; più specificatamente vengono prese quattro misure del diametro e quattro misure delle altezze, poi per le varie prove vengono assunti i valori medi dei diametri e delle altezze calcolati. In seguito si passa al tracciamento di due diametri sui provini, identificati da un apposito numeretto (1 e 2) che serviranno poi per l'esecuzione delle prove di modulo e fatica.
Segue la pesatura dei diversi provini per determinare l'effettiva massa da essi assunta ed il calcolo dei volumi tramite la formula:

$$V\ [mm^3] = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H$$

***Equazione 3.1***

Dove: D = diametro del provino [mm]
H = altezza del provino [mm]
Infine vengono poi calcolati i vuoti tramite la seguente formula:

$$V\ [\%] = \frac{\rho max - \rho}{\rho max}$$

***Equazione 3.2***

Dove: $\rho_{max}$ (densità massima) attribuito in base alla tipologia di miscela [kg/m$^3$]
$\rho$=m/V (densità) con m=massa provino e V=volume provino [kg/m$^3$]

## *3.6 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA*

La sperimentazione eseguita presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura", ha avuto come obiettivo quello della valutazione delle

caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso realizzato con le tecnologie Warm ed utilizzando un'alta percentuale di RAP secondo i procedimenti precedentemente descritti, con particolare riferimento alla valutazione del Modulo di rigidezza elastico (Modulo Complesso) e della Resistenza a Fatica. I risultati ottenuti verranno poi confrontati con le caratteristiche meccaniche presentate dai conglomerati bituminosi tradizionali.

I provini ottenuti a seguito del processo di miscelazione e compattazione sono stati sottoposti a prove di caratterizzazione fisico-meccanica. In particolare si è proceduto alla valutazione dei vuoti, l'esecuzione delle prove di modulo e successivamente le prove di fatica.

Di seguito si riporta il dettaglio del programma sperimentale:

| FAMIGLIA | n° PROVINI PER MODULO | n° PROVINI PER CREEP |
|---|---|---|
| C0-15 (REF) | 8 | 6 |
| C2-30-3.4 | 8 | 6 |
| C2-20-4.1 | 10 | 9 |

**Tabella 3.8** – *Programma sperimentale*

I provini utilizzati per le due prove sono caratterizzati circa dalle stesse dimensioni: il diametro è di 100 mm e l'altezza di 55 mm.

Le prove relative all'analisi di tali proprietà sono state eseguite mediante l'utilizzo dell'apparecchiatura denominata Nottingham Asphalt Tester (NAT), una strumentazione versatile che permette di eseguire una molteplicità di prove di caratterizzazione meccanica delle miscele.

### *3.6.1 NAT*

Il NAT è un innovativo apparato di prova che permette di determinare alcune delle principali proprietà meccaniche dei conglomerati bituminosi, tra cui:

- Modulo di rigidezza;
- Resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti;
- Resistenza a fatica.

Esso è essenzialmente composto da tre sezioni fondamentali:

- Una struttura di test con unità pneumatica di carico esterna;
- Una camera climatica a temperatura controllata;
- Un sistema di acquisizione e controllo dati.

**Figura 3.22** - *NAT con provino sottoposto alla prova di modulo*

La struttura meccanica nella quale viene effettuato il test è costituita da una base di appoggio in acciaio sulla quale sono posizionati due montanti verticali filettati grazie ai quali è possibile regolare l'altezza dell'attuatore pneumatico che si trova nella parte superiore. La possibilità di modificare la distanza tra questi due elementi è fondamentale in quanto le diverse prove che possono essere effettuate con questa strumentazione necessitano di altezze differenti sui provini testati. I fermi e le rondelle di regolazione servono altresì per "mettere in bolla" la strumentazione, cioè garantire la perfetta verticalità dell'apparato di prova. La struttura che permette l'imposizione del carico è costituita da una base orizzontale, la cui altezza viene regolata e successivamente bloccata per mezzo dei contrasti presenti, su cui è montato l'attuatore pneumatico al quale è collegato il pistone. A quest'ultimo è collegata la cella di carico, il cui compito è di trasmettere il carico secondo il segnale che viene inviato dall'unità di analisi e attuazione, secondo un impulso che varia in base alla tipologia di prova effettuata. La posizione dell'attuatore è importante ai fini della qualità di carico applicato: se si vuole un impulso di tipo istantaneo è necessario avvicinare quanto più possibile la testa di carico alla piastra di diffusione che si trova sulla testa del provino, altrimenti, per un carico trasmesso gradualmente, essa si troverà più in alto. L'intera struttura di test è contenuta all'interno della camera climatica con la quale è possibile impostare e regolare la temperatura di prova tramite un'unità digitale esterna collegata ad un termometro interno alla camera stessa.
L'unità pneumatica deve essere collegata ad un compressore che sia in grado di fornire aria secca ad almeno 7 bar di pressione. L'unità di controllo e acquisizione dati è costituita da sei moduli assemblati che effettuano il controllo degli apparati elettrici presenti, come attuatore e trasduttori, ed è direttamente collegata al computer presente.

### *3.6.2 Prova di modulo*

Nello studio del modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (Indirect Tensile Stiffness Modulus – ITSM) sono state eseguite prove in controllo di deformazione, sebbene siano consentite misure anche in controllo di tensione.

La norma UNI EN 12697-26 [N20] prevede che tali prove di modulo siano ripetute su due diametri del provino formanti tra loro un angolo di 90°±10°.
Quando i risultati ottenuti per il secondo diametro differiscono da quelli ottenuti per il primo in un intervallo compreso tra +10% e -20%, si considera come valore del modulo la media delle due ripetizioni mentre, se ciò non avviene, entrambi i risultati devono essere scartati ed entrambe le prove ripetute.
Attraverso il software di controllo dell'apparecchiatura è possibile verificare in maniera automatica tutte le variabili in gioco:

- il tempo di picco (rise time);
- la deformazione orizzontale imposta (nel caso in esame pari a 5 μm);
- il coefficiente di Poisson (pari a 0.35);
- la temperatura di prova (nel caso in esame pari a 20°C)

La verifica ed il controllo di queste grandezze avviene tramite un sistema di gestione che opera in maniera tale da applicare, prima della prova vera e propria, degli impulsi di condizionamento che servono sia per assestare il carico sulla superficie del provino che per effettuare una taratura dello stesso in maniera tale che esso produca la deformazione orizzontale imposta (5 μm).
Le specifiche condizioni di prova utilizzate per ottenere il modulo di rigidezza nel corso della prova ITSM, rendono ammissibile l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide, in prima approssimazione, anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Il modulo è, quindi, funzione della geometria del provino, della sua deformazione orizzontale e del coefficiente di Poisson del materiale.
Considerando dunque lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il campione durante la prova (Figura 3.23), è possibile ricavare, in corrispondenza del diametro orizzontale, le sollecitazioni medie e massime a trazione (direzione x) e compressione (direzione y) mediante le seguenti espressioni:

$$\sigma_x(\text{max}) = \frac{2\cdot P}{\pi\cdot d\cdot t}$$

***Equazione 3.3***

$$\sigma_x(\text{media}) = \frac{0.273\cdot P}{d\cdot t}$$

***Equazione 3.4***

$$\sigma_y(\text{max}) = \frac{-6\cdot P}{\pi\cdot d\cdot t}$$

***Equazione 3.5***

$$\sigma_y(\text{media}) = \frac{-p}{d\cdot t}$$

***Equazione 3.6***

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

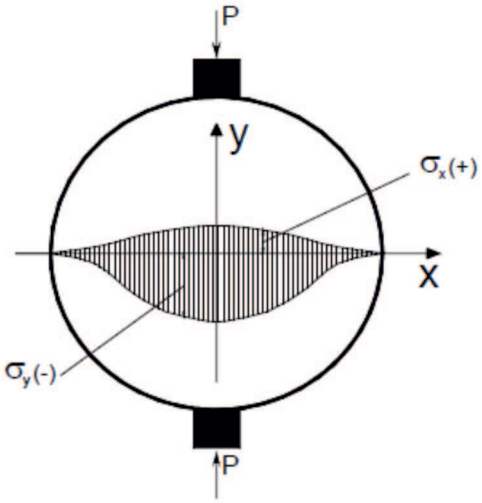


**Figura 3.23** - *Stato di sollecitazione durante la prova di modulo*

In funzione di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni, al fine di determinare il modulo di rigidezza è necessario considerare la deformazione orizzontale, $\varepsilon_x$, di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni, espressa mediante la seguente equazione:

$$\varepsilon_x(media)=\frac{\sigma x(\text{media})}{E}-\upsilon\,\frac{\sigma y(\text{media})}{E}$$

***Equazione 3.7***

Dove: υ = coefficiente di Poisson del materiale;
E = modulo elastico del materiale.

Sostituendo nella precedente formula le relazioni ricavate per le tensioni medie ($\sigma_x$ e $\sigma_y$) e tenuto conto che la deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media $\varepsilon_x$ per il diametro d del provino, si ottiene:

$$\Delta=\frac{0.273\cdot P}{E\cdot t}+\upsilon\,\frac{P}{E\cdot t}$$

***Equazione 3.8***

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale:

$$E\ [\mathrm{N/m^2}]=\frac{P}{\Delta\cdot t}\cdot(0.273+\upsilon)$$

***Equazione 3.9***

Il software utilizzato fornisce direttamente il valore del modulo elastico risultante dall'esecuzione della prova, a cui è stato già applicato un fattore di correzione AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico e della temperatura di prova.
Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione regolari, tempi di picco intorno a 124 ms ed una deformazione di trazione (direzione x) prossima ai 5 µm. Infatti, le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- *Temperatura di prova*: influisce in maniera significativa sulla vita utile del materiale in quanto è ben noto che il modulo di un conglomerato bituminoso decresce all'aumentare della temperatura;
- *Rise-time* (tempo di picco): a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati bituminosi dipende fortemente dal tempo di applicazione di carico. In particolare il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante per raggiungere il valore massimo. Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo determina sulla rigidezza del conglomerato gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale). La relazione che lega la frequenza di carico con il tempo di picco è infatti:

$$f=1000/(4\cdot rt)$$

***Equazione 3.10***

Dove: $rt$ = rise – time [ms]
$f$ = frequenza [Hz]

Da indagini sperimentali si è visto come per un conglomerato bituminoso il rise-time più adatto sia pari a 124 ms, corrispondente ad un frequenza di circa 2 Hz.

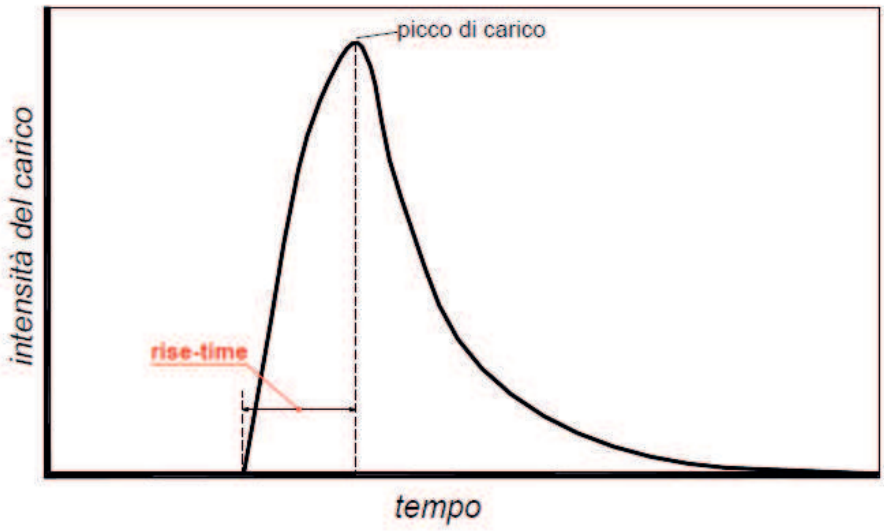


**Figura 3.24** - *Forma d'onda per la prova di modulo a trazione indiretta*

- Deformazione orizzontale imposta: a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato bituminoso dipendono dal livello di deformazione orizzontale imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo un valore pari a 5 µm, ritenendo che, con tale deformazione, il materiale mantenga ancora un comportamento elastico.

- Numero di impulsi di condizionamento: è stato già visto come, attraverso un sistema di gestione ed acquisizione dati, sia possibile operare una taratura del carico durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Per ottenere valori di rigidezza affidabili è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. È stato verificato in precedenti studi come, utilizzando un basso numero di colpi, si favoriscano tempi di prova più brevi a discapito, però, di misurazioni affidabili.

Dopo aver eseguito un condizionamento di almeno 8 ore alla temperatura di prova, il provino viene alloggiato nell'apposita intelaiatura (Figura 3.22) costituita da:

- Telaio principale che ha la funzione di sostenere il provino e risulta costituito da una base sulla quale è posizionato un sistema di barre a V che, nella posizione rialzata, danno sostegno al campione. Sul telaio sono inoltre presenti due aste verticali che fungono da guida per la barra di carico superiore;
- Telaio porta trasduttori che consente di sorreggere i trasduttori di spostamento, i quali vengono posizionati in corrispondenza del diametro orizzontale, perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico. Esso è munito di quattro morsetti a vite che servono per ancorarlo, rendendolo solidale al provino;
- Barra di carico superiore che si inserisce lungo le guide verticali del telaio principale allo scopo di contrastare diametralmente il provino;
- Semisfera di acciaio che, sistemata nell'apposito alloggiamento, completa l'allestimento del provino.

Tutti i parametri di prova vengono controllati grazie ad un apposito software che consente di eseguire la fase di input mediante una specifica finestra di dialogo (Figura 3.25) in cui figurano la temperatura, il diametro e l'altezza del provino, il coefficiente di Poisson del materiale, il rise-time, il valore della deformazione orizzontale imposta ed il numero di impulsi di condizionamento.
Il software mostra successivamente alcuni passaggi in cui vengono spiegate le operazioni da eseguire per il corretto posizionamento del provino e dell'attuatore di carico, il quale, attraverso il comando "Make contact", andrà ad appoggiarsi perfettamente sulla semisfera alloggiata sopra la barra di carico. Si ricorre all'ausilio delle finestre del software anche per il corretto posizionamento dei trasduttori di spostamento, i quali, per il limitato range di validità, devono essere sistemati sempre con accurata precisione.

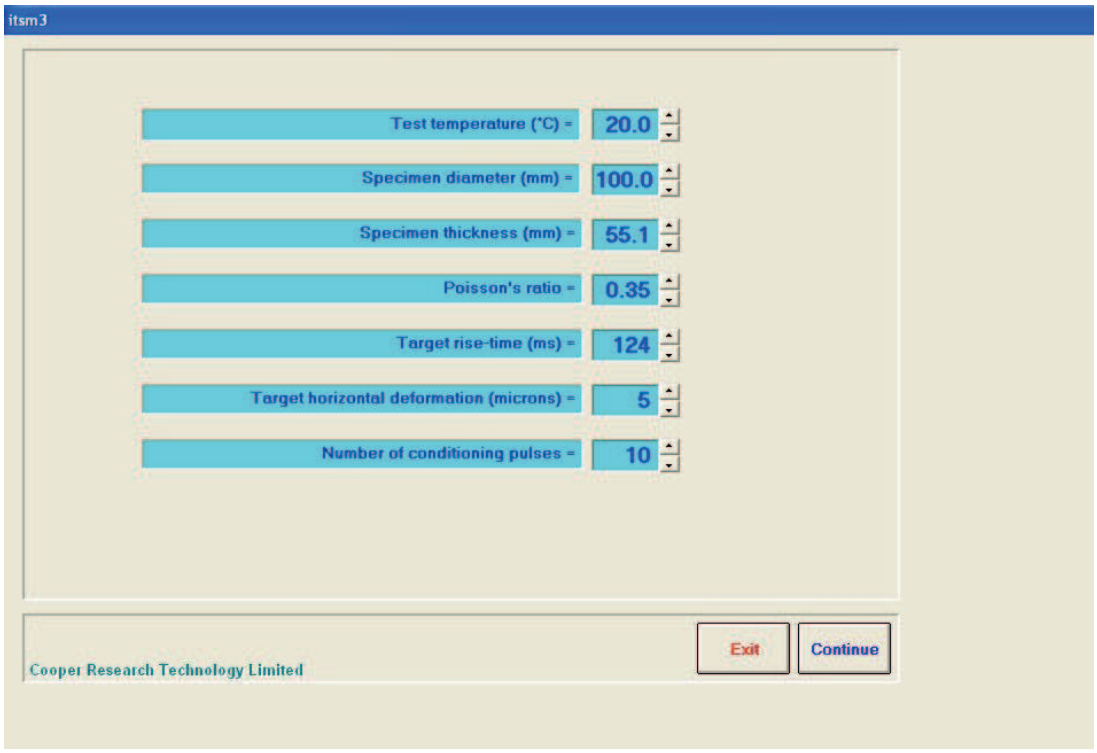


**Figura 3.25** - *Parametri di input richiesti dal software della prova di modulo*

Al termine delle fasi sopra descritte, il sistema inizia ad imprimere gli impulsi di condizionamento impostati, disegnando, di volta in volta, sullo schermo la curva di carico e quella di deformazione. Ultimata tale fase, il sistema controlla nuovamente la posizione dei trasduttori ed inizia la misurazione vera e propria del modulo. A prova terminata compare una schermata (Figura 3.26) che restituisce i valori delle cinque applicazioni di carico (curva rossa) con le relative deformazioni (curva celeste) ed i valori medi di tutte le grandezze misurate e calcolate.

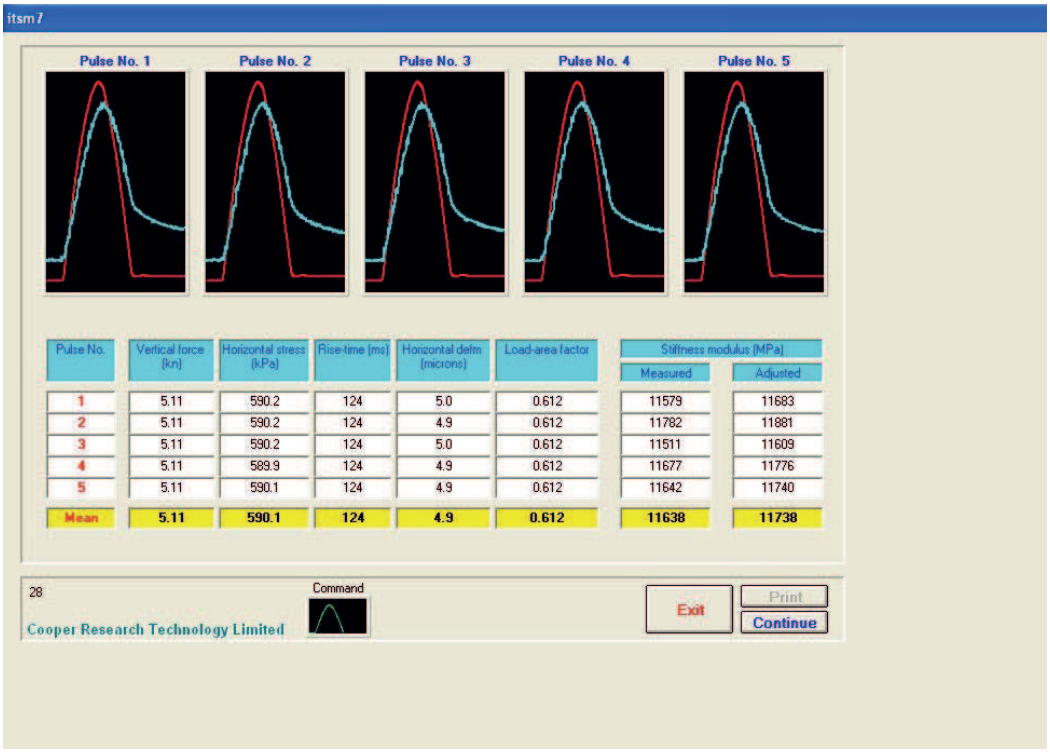


**Figura 3.26** - *Output della prova di modulo*

### *3.6.3 Prova di resistenza a fatica*

Le prove di resistenza all'applicazione di carichi ripetuti, effettuate mediante l'apparecchiatura NAT, sono state eseguite in modalità di tensione controllata, utilizzando gli stessi provini già testati in termini di modulo a trazione indiretta

**Figura 3.27** - *NAT con provino sottoposto alla prova di fatica*

Dopo aver effettuato il condizionamento per almeno 8 ore alla temperatura di prova, il campione viene alloggiato in un telaio metallico molto più semplice rispetto a quello delle prove di modulo a trazione indiretta. Il provino viene, infatti, appoggiato alla barra di carico inferiore (Figura 3.27) ponendogli sopra, in maniera perfettamente simmetrica, la barra di carico superiore. Anche in questa prova, l'apparecchiatura è controllata da un software che ne automatizza la procedura di input attraverso una specifica finestra di dialogo (Figura 3.28) che consente di inserire la temperatura di prova, la geometria del provino (diametro e spessore), il rise-time, la tensione orizzontale con cui si vuole sollecitare il campione ad ogni impulso e la massima deformazione verticale. Il parametro relativo alla tensione orizzontale è scelto dall'operatore in base alla propria esperienza in maniera tale che la prova termini in tempi ragionevoli (< 100000 cicli) senza però provocare rotture troppo rapide del campione (< 1000 cicli).

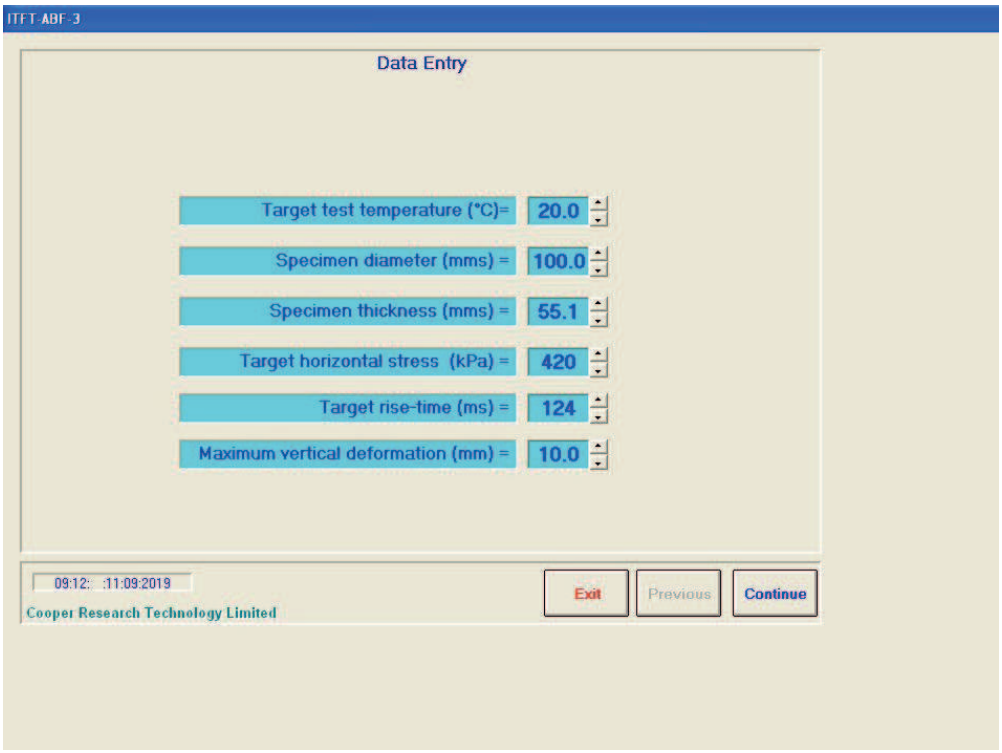


**Figura 3.28** - *Parametri di input per la prova di resistenza ai carichi ripetuti*

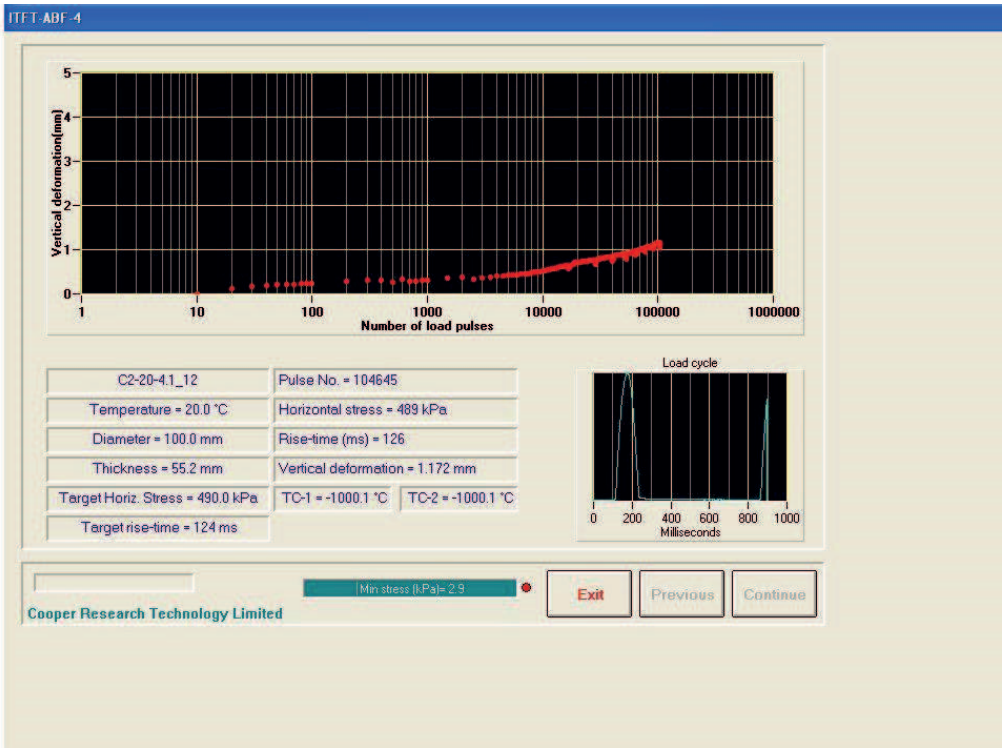


**Figura 3.29** - *Output della prova di resistenza ai carichi ripetuti*

Attraverso l'inserimento della massima deformazione verticale si imposta invece un controllo che ha lo scopo di interrompere la prova qualora tale deformazione venisse superata; l'esperienza consiglia di assegnare a tale grandezza un valore di 10 mm in maniera tale da avere un margine sufficiente per completare la prova.

Con il software in dotazione, quindi, le prove possono terminare a seguito del raggiungimento della massima deformazione verticale accumulata o a causa dell'impossibilità dell'attuatore di continuare ad applicare la sollecitazione imposta per più di 50 cicli consecutivi.

Il software di gestione presenta, tuttavia, l'inconveniente di acquisire i dati solo con cadenza logaritmica, avendo quindi a disposizione un discreto quantitativo di informazioni fino a 10000 cicli, dopodiché l'acquisizione diventa abbastanza diradata.

Inoltre, nel caso in cui non si riesca ad applicare una sollecitazione imposta per più di 50 cicli, non viene registrato alcun valore, poiché il sistema riscontra un overflow. In questa situazione risulta necessario, prima di uscire dal programma, annotare manualmente il ciclo in corrispondenza del quale la prova si è interrotta.

Al termine della prova vengono restituiti un file di output ed una schermata (Figura 3.29) in cui si riportano il numero di cicli di carico necessari per la rottura del campione e le deformazioni permanenti accumulate.

Lo studio del comportamento a fatica di un materiale bituminoso prevede la realizzazione di una serie di prove, in cui l'ampiezza della sollecitazione viene fatta variare in un range di possibili valori. Nel caso in esame, per ogni materiale, sono stati considerati 3 differenti livelli di tensione per ciascuno dei quali sono state eseguite 2 ripetizioni.

Il numero di cicli di carico a rottura per ogni provino sono stati riportati in un piano bi-logaritmico in funzione della deformazione iniziale orizzontale massima ed interpolati mediante una legge di tipo lineare, ottenendo per ogni miscela le curve di Wöhler (o curve di fatica):

$$\varepsilon = AN^{-b}$$

**Equazione 3.11**

Dove: A, b = coefficienti legati alla composizione e alle proprietà della miscela;

N = numero di applicazioni di carico;

ε = ampiezza della deformazione iniziale orizzontale massima al centro del provino, calcolata come:

$$\varepsilon = \frac{\sigma \times (1+3\nu)}{\mathrm{Sm}} \times 1000$$

***Equazione 3.12***

Con: σ = tensione di trazione massima al centro del provino (kPa);

ν = rapporto di Poisson (assunto pari a 0.35);

Sm = modulo a trazione indiretta (MPa).

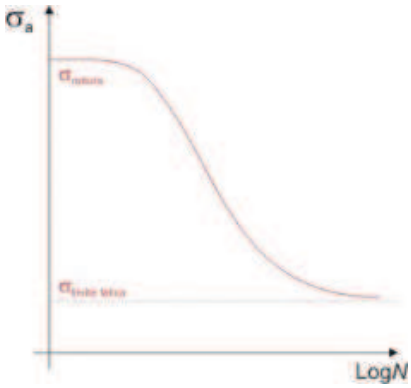


**Figura 3.30** - *Curva di fatica*

# *Capitolo 4 - Risultati sperimentali*

All'interno di questo capitolo si riportano i dati analizzati relativi alle tre miscele studiate mediante il confronto in termini di caratteristiche meccaniche dei diversi conglomerati bituminosi. Si vuole inoltre descrivere e giustificare la procedura d'analisi, che è la medesima per ogni miscela.

Le prestazioni studiate sono le seguenti:

- Il modulo di rigidezza
- La resistenza a fatica

## *4.1 IL MODULO DI RIGIDEZZA*

Le seguenti tabelle riportano per ogni miscela i valori dei moduli di rigidezza (ITSM) misurati per ciascun provino, nonché il valore medio e la deviazione standard.

| **Mix C0-15** | |
|---|---|
| Specimen | Average ITSM |
| (code) | (MPa) |
| MIXC_7 | 14093 |
| MIXC_8 | 12219 |
| MIXC_9 | 12939 |
| MIXC_10 | 14051 |
| MIXC_11 | 13622 |
| MIXC_12 | 14585 |
| MIXC_13 | 14383 |
| MIXC_14 | 14895 |
| | |
| | |
| | |
| media | **13848** MPa |
| dev. Standard | **833,5** Mpa |

**Tabella 4.2** - *Moduli di rigidezza miscela C0-15 (REF)*

| **Mix C2-30-3.4** | |
|---|---|
| Specimen | Average ITSM |
| (code) | (MPa) |
| C2-30-3.4_7 | 9322 |
| C2-30-3.4_8 | 10164 |
| C2-30-3.4_9 | 9940 |
| C2-30-3.4_10 | 10614 |
| C2-30-3.4_11 | 9581 |
| C2-30-3.4_12 | 10292 |
| C2-30-3.4_13 | 9655 |
| C2-30-3.4_14 | 9287 |
| | |
| | |
| | |
| media | **9857** Mpa |
| dev. Standard | **446,1** MPa |

**Tabella 4.1** - *Moduli di rigidezza miscela C2-30-3.4*

| Mix C2-20-4.1 | |
|---|---|
| Specimen | Average ITSM |
| (code) | (MPa) |
| C2-20-4.1_7 | 8598 |
| C2-20-4.1_8 | 9585 |
| C2-20-4.1_9 | 9501 |
| C2-20-4.1_10 | 9855 |
| C2-20-4.1_11 | 8808 |
| C2-20-4.1_12 | 9027 |
| C2-20-4.1_13 | 9637 |
| C2-20-4.1_14 | 9889 |
| C2-20-4.1_15 | 9808 |
| C2-20-4.1_16 | 9618 |
| | |
| media | **9432** MPa |
| dev. Standard | **433,9** MPa |

**Tabella 4.3** - *Moduli di rigidezza miscela C2-20-4.1*

L'istogramma che segue riporta i valori medi del ITSM e permette il confronto diretto tra le miscele oggetto di indagine.

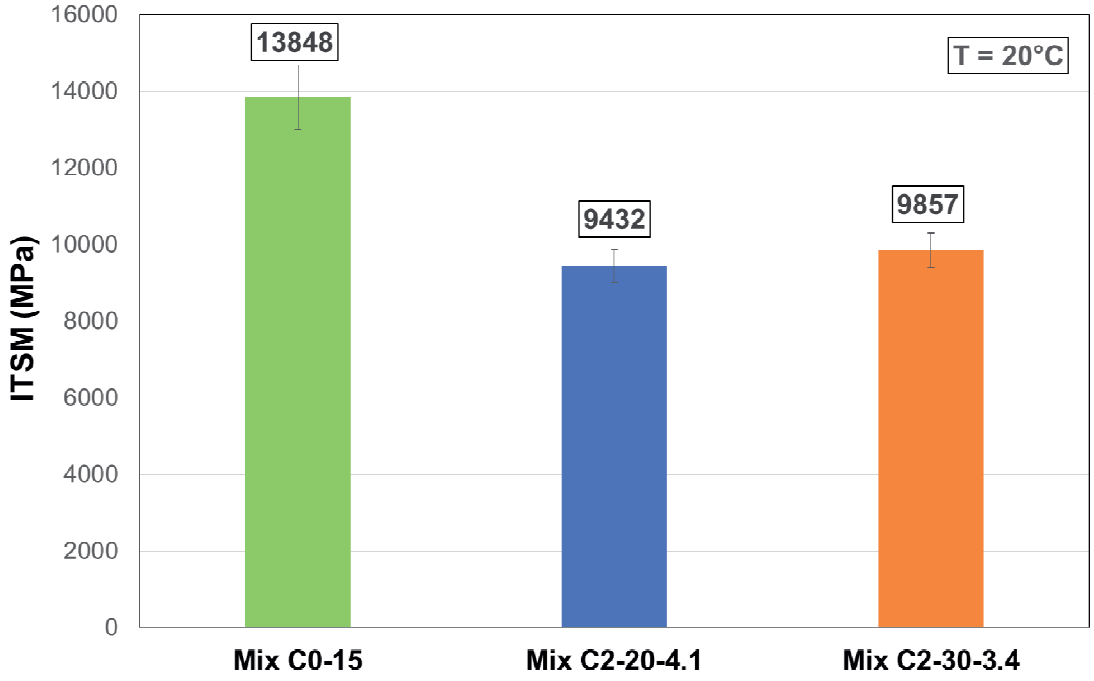


**Figura 4.1** - *Moduli di rigidezza delle tre miscele a confronto*

Dall'analisi dei risultati è possibile osservare che la Mix C0-15, ovvero la miscela realizzata con metodologia tradizionale a caldo, presenta una rigidezza notevolmente maggiore rispetto alle altre due realizzate invece mediante tecnologia WMA nonostante queste ultime includano maggiori contenuti di RAP. Una prima motivazione può essere ricercata nel minor contenuto di vuoti residui

della miscela tradizionale, rispetto alle miscele WMA. Ciò è dovuto essenzialmente alla maggiore temperatura di compattazione (150°) che ha comportato un maggior addensamento della miscela di riferimento. Le Tabelle 4.4 - 4.5 - 4.6 riassumono i valori del contenuto dei vuoti residui per ciascun provino di ciascuna miscela; possiamo notare che la miscela che presenta un minor contenuto di vuoti delle tre è proprio la miscela di riferimento MIX C mentre le altre due sono caratterizzate circa dallo stesso contenuto di vuoti, ed infatti la loro rigidezza è pressoché simile (Figura 4.1). Un altro importante aspetto è legato al maggior invecchiamento che subisce la fase legante (bitume) della miscela di riferimento a causa della maggior temperatura di produzione (miscelazione e compattazione). In generale, un maggior invecchiamento del bitume risulta in un maggior irrigidimento della miscela. Tale considerazione trova riscontro nei dati sperimentali (Figura 4.1), infatti le miscele WMA prodotte con temperature più basse rispetto alla miscela tradizionale risultano meno rigide. Questo risultato evidenzia che le tecnologie WMA non inducendo elevati stress termici alle miscele durante la produzione, permettono di ottenere miscele non troppo rigide e dunque caratterizzate da una minore propensione alla fessurazione.

| Specimen reference | V |
|---|---|
| | (%) |
| MIXC_7 | 2,4 |
| MIXC_8 | / |
| MIXC_9 | 4,4 |
| MIXC_10 | / |
| MIXC_11 | 3,9 |
| MIXC_12 | / |
| MIXC_13 | 2,0 |
| MIXC_14 | 2,6 |

**Tabella 4.4** - *Vuoti miscela C0-15 (REF)*

| Specimen reference | V |
|---|---|
| | (%) |
| C2-20-4.1_7 | 5,7 |
| C2-20-4.1_8 | 6,0 |
| C2-20-4.1_9 | 7,3 |
| C2-20-4.1_10 | 6,4 |
| C2-20-4.1_11 | 6,3 |
| C2-20-4.1_12 | 5,5 |
| C2-20-4.1_13 | 6,0 |
| C2-20-4.1_14 | 5,6 |
| C2-20-4.1_15 | 6,6 |
| C2-20-4.1_16 | 5,7 |

**Tabella 4.6** - *Vuoti miscela C2-20-4.1*

| Specimen reference | V |
|---|---|
| | (%) |
| C2-30-3.4_7 | 6,2 |
| C2-30-3.4_8 | 5,7 |
| C2-30-3.4_9 | 6,1 |
| C2-30-3.4_10 | 5,2 |
| C2-30-3.4_11 | 5,9 |
| C2-30-3.4_12 | 5,5 |
| C2-30-3.4_13 | 5,2 |
| C2-30-3.4_14 | 5,5 |

**Tabella 4.5** - *Vuoti miscela C2-30-3.4*

## *4.2 LA RESISTENZA A FATICA*

Come già anticipato i provini testati per la misura del modulo di rigidezza, sono stati successivamente sottoposti a prova di rottura ciclica per la determinazione della risposta a fatica delle miscele oggetto di indagine. Le tabelle seguenti riportano i risultati delle prove di fatica della miscela di riferimento e delle due miscele WMA. In particolare, per ciascun provino sono riportati i n° di cicli a rottura in relazione alla deformazione iniziale applicata che viene presa in considerazione per il calcolo della tensione da applicare al provino. Per ciascuna miscela sono stati scelti tre livelli di deformazione (rispettivamente basso, medio e alto) e per ciascun livello sono state eseguite due ripetizioni.

| Mix C0-15 | | |
|---|---|---|
| Specimen | Initial Strain | Failure |
| (code) | (mstrain) | (n° cycles) |
| MIXC_8 | 80 | 194500 |
| MIXC_9 | 80 | 133500 |
| MIXC_14 | 100 | 23500 |
| MIXC_12 | 100 | 36000 |
| MIXC_10 | 125 | 6000 |
| MIXC_13 | 125 | 6886 |

**Tabella 4.7** - Risultati prova di resistenza a fatica miscela C0-15

| Mix C2-30-3.4 | | |
|---|---|---|
| Specimen | Initial Strain | Failure |
| (code) | (mstrain) | (n° cycles) |
| C2-30-3.4_11 | 100 | 151000 |
| C2-30-3.4_13 | 100 | 183500 |
| C2-30-3.4_7 | 125 | 39500 |
| C2-30-3.4_14 | 125 | 47500 |
| C2-30-3.4_8 | 150 | 7562 |
| C2-30-3.4_12 | 150 | 11500 |

**Tabella 4.8** - *Risultati prova di resistenza a fatica miscela C2-30-3.4*

| Mix C2-20-4.1 | | |
|---|---|---|
| Specimen | Initial Strain | Failure |
| (code) | (µstrain) | (n° cycles) |
| C2-20-4,1_11 | 100 | 143700 |
| C2-20-4,1_12 | 100 | 152500 |
| C2-20-4,1_16 | 125 | 24500 |
| C2-20-4,1_15 | 125 | 20000 |
| C2-20-4,1_10 | 150 | 5000 |
| C2-20-4,1_14 | 150 | 8000 |

**Tabella 4.9** - Risultati prova di resistenza a fatica miscela C2-20-4.1

La Figura 4.2 mostra la relazione che intercorre tra la deformazione iniziale e il numero di cicli a rottura delle tre miscele. In particolare, a seguito di una regressione lineare dei dati sperimentali è stato possibile individuare per ciascuna miscela la retta di fatica rappresentativa del comportamento a fatica del materiale. Gli elevati valori del coefficiente di correlazione "$R^2$" testimoniano la bontà dei risultati ottenuti.

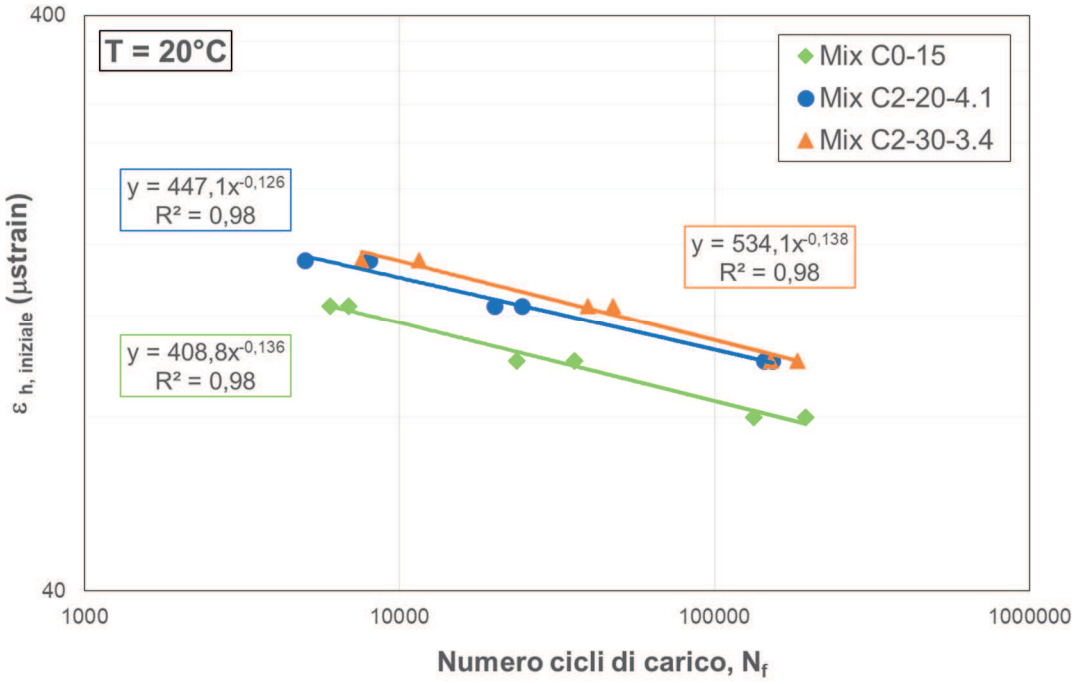


**Figura 4.2** - *Resistenza a fatica delle tre miscele a confronto*

Dal grafico si può notare che la resistenza a fatica del conglomerato bituminoso tradizionale risulta essere inferiore rispetto a quella dei conglomerati bituminosi tiepidi. Inoltre, è possibile osservare che la miscela contenente maggior fresato sembra mostrare un migliore comportamento a fatica. La motivazione di tali risultati può essere trovata nella diversa rigidezza delle miscele (paragrafo 4.2). In particolare, la maggior rigidezza riscontrata per la miscela di riferimento conferisce un comportamento più fragile e dunque una rottura prematura rispetto alle due miscele tiepide.

# *Capitolo 5 - Conclusioni*

La seguente sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura" dell'Università Politecnica delle Marche è stata volta al fine di studiare le caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi tiepidi ad alte percentuali di fresato destinati all'utilizzo nello strato di usura delle pavimentazioni stradali. A tal fine, la sperimentazione ha previsto un confronto prestazionale tra una miscela di riferimento prodotta a caldo e due miscele prodotte con tecnologia WMA contenenti due differenti quantitativi di fresato stradale. La caratterizzazione meccanica ha previsto prove dinamiche in configurazione di trazione indiretta atte alla misura del modulo di rigidezza e della resistenza a fatica.

Dall'analisi complessiva è stato possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- ✓ L'elevato contenuto di fresato non penalizza eccessivamente l'addensamento delle miscele bituminose tiepide sebbene le ridotte temperature di produzione.

- ✓ L'impiego delle ridotte temperature di produzione della tecnologia WMA ha permesso di ottenere miscele bituminose meno rigide rispetto alla miscela tradizionale di riferimento e dunque caratterizzate da una minore propensione alla fessurazione.

- ✓ Le miscele tiepide oggetto d'indagine sono caratterizzate da una maggiore resistenza a fatica, dovuta alla minore rigidezza.

- ✓ Il maggior contenuto di fresato nelle miscele tiepide non influisce significativamente sulla rigidezza del materiale ma sembra garantire un miglior comportamento a fatica

## *BIBLIOGRAFIA*

[1] G. Tesoriere, G. Barresi, F. Corriere, M.F. Tschincke, A. Pasta - “La reologia dei conglomerati bituminosi nella tecnica stradale. Considerazioni e risultati sperimentali” - riv. La rivista della strada n°428 (marzo 1977)

[2] P. Ferrari, F. Giannini - “Ingegneria stradale : corpo stradale e pavimentazioni, vol 2°”- ISEDI Petrini editore spa, Torino (1989)

[3] Santagata, E.- “Proprietà fisiche degli aggregati lapidei e loro influenza sulle prestazioni delle miscele bituminose” - Rassegna del Bitume, n. 31/98, Anno XXIV– II Semestre (1998)

[4] “Idee Green” – Economia circolare