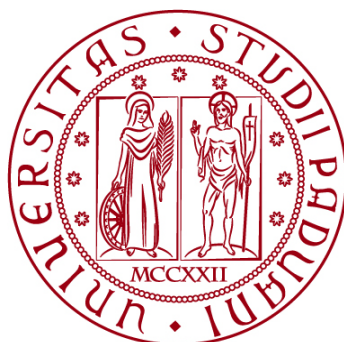


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

RIGENERAZIONE OTTIMIZZATA DI
BITUME INVECCHIATO DA FRESATO
D'ASFALTO: VALIDAZIONE
SPERIMENTALE SU MISCELE CON
ELEVATO TENORE DI
CONGLOMERATO BITUMINOSO
RECUPERATO

Relatore:
Chiar.mo PROF. EMILIANO PASQUINI
Correlatori:
Chiar.mo ING. ANDREA BALIELLO

Laureando: ANDREA FRISSELLE
Matricola 2036532

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

RIASSUNTO

Lo studio qui condotto si propone di indagare il quantitativo ottimale dell'additivo ringiovanente utilizzato all'interno di miscele di conglomerato bituminoso contenente il fresato riciclato (RAP). L'additivo ha la funzione di ripristinare le funzioni visco-elastiche e resistive del conglomerato, riducendo gli effetti dell'invecchiamento accumulati durante gli anni di esercizio della pavimentazione stradale.

In particolare, sono state realizzate varie miscele bituminose contenenti quantità d'additivo differenti per individuare la percentuale ottimale mediante lo studio delle caratteristiche visco-elastico attraverso la prova DSR (Dynamic Shear Rheometer) e, mediante la medesima prova si è studiato il comportamento del bitume invecchiato. Dai risultati ottenuti si sono poi realizzate, attraverso la miscelazione con aggregati lapidei, quattro conglomerati bituminosi differenti. I conglomerati differiscono dalla percentuale di additivo ringiovanente all'intento del bitume e precisamente si sono realizzate miscele BASE (0%), ROPT (% ottimale di ringiovanente), ROPT+30 (30% in più rispetto l'ottimale) e ROPT-30 (30% in meno rispetto l'ottimale).

I conglomerati sono stati compattati mediante pressa giratoria e compattatore a rullo per la realizzazione di provini di diverse forme e dimensioni. Quest'ultimi sono stati testati mediante prova WTT (Wheel Tracking Test), ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus), RLAT (Repeated Load Axial Test), ITS (Indirect Tensile Strength) e 4PBT (Four Point Bending Test) per studiare le prestazioni del materiale nei confronti dei carichi dinamici e confrontare i risultati al fine della validazione della procedura di determinazione del dosaggio di ringiovanente.

INDICE

| | |
|--------------------------|----------|
| INTRODUZIONE..... | 1 |
|--------------------------|----------|

CAPITOLO 1

| | |
|--|----------|
| IL RICICLAGGIO A CALDO DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO: STATO DELL'ARTE | 3 |
|--|----------|

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | La struttura della pavimentazione stradale..... | 3 |
| 1.2 | Studi scientifici sulle prestazioni del fresato d'asfalto | 12 |

CAPITOLO 2

| | |
|---|-----------|
| RICICLAGGIO A CALDO, RAP E RINGIOVANENTE | 31 |
|---|-----------|

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) e metodi di riciclo | 31 |
| 2.1.1 | Impianti discontinui | 36 |
| 2.1.2 | Impianti continui | 42 |
| 2.2 | Caratteristiche fisico-chimiche del Bitume | 48 |
| 2.2.1 | Tipologie ed effetti dell'invecchiamento del bitume..... | 49 |
| 2.3 | Additivi ringiovanenti..... | 52 |

CAPITOLO 3

| | |
|------------------------------------|-----------|
| OBIETTIVI DELL'ANALISI..... | 57 |
|------------------------------------|-----------|

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 3.1 | Descrizione generale e obiettivi..... | 57 |
|-----|---------------------------------------|----|

CAPITOLO 4

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| ATTIVITÀ SPERIMENTALE..... | 61 |
|-----------------------------------|-----------|

| | | |
|-------|------------------------------------|----|
| 4.1 | Materiali costituenti..... | 61 |
| 4.1.1 | Aggregati di origine naturale..... | 61 |
| 4.1.2 | Il fresato | 63 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1.3 | Bitume..... | 63 |
| 4.1.4 | Ringiovanente | 64 |
| 4.1.5 | Test preliminari sui materiali | 66 |
| 4.1.5.1 | Analisi granulometrica | 66 |
| 4.1.5.2 | Determinazione della quantità di legante nel fresato | 67 |
| 4.1.5.3 | Caratteristiche fisiche degli aggregati naturali | 68 |
| 4.1.5.4 | Caratteristiche meccaniche del fresato | 72 |
| 4.1.5.5 | Caratteristiche fisiche del bitume | 73 |
| 4.2 | Caratterizzazione dei leganti..... | 75 |
| 4.2.1 | Materiali e confezionamento dei campioni | 75 |
| 4.2.2 | Test reologici a scala legante | 79 |
| 4.3 | Produzione delle miscele..... | 83 |
| 4.3.1 | Mix-design delle miscele | 83 |
| 4.3.2 | Confezionamento dei campioni..... | 85 |
| 4.3.2.1 | Compattazione con pressa giratoria..... | 85 |
| 4.3.2.2 | Compattazione mediante rullo..... | 88 |
| 4.4 | Caratterizzazione delle miscele..... | 90 |
| 4.4.1 | Proprietà volumetriche delle miscele | 90 |
| 4.4.2 | Caratteristiche meccaniche delle miscele..... | 92 |
| 4.4.3 | Rigidezza delle miscele..... | 94 |
| 4.4.4 | Resistenza alle deformazioni permanenti delle miscele..... | 97 |
| 4.4.5 | Resistenza a fatica delle miscele | 100 |

CAPITOLO 5

RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE..... 101

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.1 | Proprietà di base dei materiali costituenti | 101 |
| 5.2 | Determinazione del contenuto ottimale di ringiovanente | 108 |
| 5.3 | Validazione del protocollo a livello di miscela | 119 |
| 5.3.1 | Mix design..... | 119 |
| 5.3.2 | Lavorabilità..... | 122 |
| 5.3.3 | Rigidezza..... | 132 |
| 5.3.4 | Resistenza alla fessurazione a basse temperature..... | 137 |
| 5.3.5 | Resistenza alle deformazioni permanenti..... | 140 |
| 5.3.6 | Resistenza a fatica | 144 |

CONCLUSIONI..... 147

BIBLIOGRAFIA..... 151

INTRODUZIONE

L'obiettivo principale del lavoro svolto in questo elaborato è inerente all'utilizzo del fresato riciclato all'interno delle pavimentazioni stradali, che viene trattato sia in forma bibliografica, con la spiegazione dei vari metodi empirici utilizzati nella realtà ingegneristica, sia nel lavoro sperimentale svolto all'interno del Laboratorio Stradale del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

Il riciclaggio del fresato si distingue in due macro-classi quali il riciclaggio a freddo e il riciclaggio a caldo. Nel caso studio in oggetto ci si è concentrati sul riciclaggio a caldo, trattandolo dapprima con un'ampia ricerca bibliografica e poi attraverso un esaustivo studio sperimentale in laboratorio. In particolare, sono stati presentati sia i vari metodi di riciclaggio utilizzati nella realizzazione delle infrastrutture stradali, sia i processi pratici eseguiti in laboratorio per la realizzazione del progetto reale.

Il progetto sperimentale eseguito nel Laboratorio Materiali Stradali del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova prende spunto dalle direttive dell'attività di ricerca RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) Technical Committee 264-RAP. Il TC 264 RAP, al quale i ricercatori di Strade, Ferrovie e Aeroporti del dipartimento ICEA partecipano, si è occupato di molteplici aspetti legati al riciclaggio del fresato di asfalto (RAP) in nuove pavimentazioni stradali. Nel dettaglio, le direttive TG3 (*Asphalt Binder for Recycled Asphalt Mixtures*) affrontano in maniera specifica le tematiche relative al riciclaggio a caldo e hanno avuto l'obiettivo di determinare un protocollo per la valutazione delle prestazioni di miscele bituminose composte da legante invecchiato ottenuto dal RAP, bitume vergine e additivo ringiovanente al fine di elaborare una procedura sperimentale per la determinazione del quantitativo ottimale di additivo ringiovanente da aggiungere nelle miscele riciclate. Sulla scorta di tale linee guida, il presente lavoro di tesi si è preoccupato di verificare l'efficacia di tale protocollo, messo a punto a livello di legante, andando a verificarne la validità a livello di miscele.

Il lavoro svolto è iniziato estraendo il legante dal fresato RAP e studiandone le caratteristiche per determinare il quantitativo ottimale di additivo ringiovanente

che ripristinasse al meglio le caratteristiche del bitume stesso in accordo con le linee guida RILEM. In seguito, sono stati realizzati provini di conglomerato bituminoso di quattro tipologie differenti: BASE (miscela senza fresato e ringiovanente), ROPT (miscela con fresato e contenuto ottimale di ringiovanente), ROPT+30 (miscela con fresato e 30% in più rispetto al contenuto ottimale di ringiovanente), ROPT-30 (miscela con fresato e 30% in meno rispetto al contenuto ottimale di ringiovanente).

I campioni di conglomerato bituminoso realizzati sono stati quindi testati per determinarne la rigidità, la resistenza alla rottura, la resistenza alle deformazioni permanenti e la resistenza a fatica.

In particolare, i primi due capitoli del presente lavoro introducono alle tematiche relative alle pavimentazioni bituminose e al riciclaggio a caldo dei loro strati superficiali una volta giunti a fine vita e quindi rimossi. Successivamente, si illustrano nel dettaglio gli obiettivi della tesi (capitolo 3) prima di descrivere le attività sperimentali condotte in laboratorio (capitolo 4) e analizzarne i corrispondenti risultati (capitolo 5). Il capitolo finale, infine, riassume e generalizza quanto emerso durante la ricerca.

CAPITOLO 1

Il riciclaggio a caldo del conglomerato bituminoso: stato dell'arte

Negli ultimi decenni il tema del riciclaggio è diventato un aspetto portante della società e delle ricerche scientifiche. Nell'ambito dell'ingegneria delle infrastrutture di trasporto il riciclo del fresato (conglomerato bituminoso di risulta da operazioni di manutenzione di pavimentazioni flessibili) è trattato ampiamente in bibliografia, studiando sia gli ambiti relativi alla componente applicativa sia i benefici in ambito economico-ambientale.

1.1 La struttura della pavimentazione stradale

La pavimentazione stradale è una sovrastruttura poggiate su un rilevato, o posta in trincea, con la funzione di realizzare una superficie regolare per il traffico veicolare. Essa è composta da vari strati, aventi ognuno un ruolo specifico, costituiti da diversi materiali e spessori.

In ambito stradale le pavimentazioni hanno, usualmente, gli strati superficiali composti da conglomerato bituminoso, e rientrano per questo nella categoria della "pavimentazioni flessibili".

Il traffico veicolare sollecita la sovrastruttura, impegnandola con carichi dinamici ripetuti. L'utilizzo di bitume e aggregati, se dimensionati correttamente, permette di sostenere le sollecitazioni e un corretto deflusso delle acque, limitando la creazione di fessurazione.

Le funzioni principali della sovrastruttura stradale sono:

- Elevata capacità di sostegno dei mezzi transitanti;
- Garanzia di stabilità e aderenza;
- Alta impermeabilità all'acqua;
- Longevità del manto stradale e di tutta la pavimentazione stradale. ^[1]

Nella *figura 1.1* si può osservare la composizione di una pavimentazione stradale flessibile.

Gli spessori indicati in figura sono variabili e dipendono dalle specifiche esigenze della sovrastruttura; per determinarli si tiene conto principalmente della percentuale di traffico pesante presente nell'area di interesse.


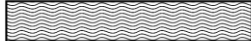


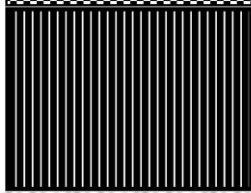

| Tipologia strato | Strato | Spessore |
|-------------------------|---|-----------------|
| Manto d'usura |  | 5~100 mm |
| Binder |  | 20~150 mm |
| Base |  | 50~250 mm |
| Fondazione legata |  | 70~300 mm |
| Fondaz. non legata |  | Variabile |
| Suolo sottostante |  | |

Figura 1.1: Stratigrafia pavimentazione stradale.

Gli strati si dividono in:

- Usura: strato superficiale composto da conglomerato bituminoso, miscela di bitume e aggregati, avente come ruolo principale il trasferimento dei carichi veicolari agli strati sottostanti. Ha la funzione di fornire un'elevata aderenza agli pneumatici dei veicoli ed essere un piano viabile regolare. Inoltre, garantisce in determinate tipologie di infrastrutture viabili un corretto smaltimento o impermeabilizzazione dall'acqua piovana.
- Binder: (o collegamento) è uno strato realizzato in conglomerato bituminoso con lo scopo di garantire un collegamento tra lo stato di usura e quello sottostante, chiamato base. Ha importante funzione strutturale che permette un adeguato passaggio dei carichi agli strati sottostanti.
- Base: questo strato è realizzato in conglomerato bituminoso o misto bitumato, ha lo scopo di garantire un adeguato trasferimento dei carichi verticali e orizzontali agli strati sottostanti.
- Sottobase: eventuale strato eseguito per aumentare la portanza della pavimentazione dovuta alla presenza di un elevato numero di veicoli

pesanti nel traffico, garantisce un corretto smaltimento dei carichi agli strati sottostanti. Viene realizzato in misto cementato granulare o misto cementato.

- Fondazione: strato a diretto contatto con il terreno sottostante (sottofondo). Ha la funzione di trasferire in modo uniforme i carichi verticali e orizzontali al sottofondo stesso ed è realizzato in misto granulare non legato.
- Sottofondo: strato ultimo della pavimentazione stradale che costituisce il piano di posa degli strati precedentemente elencati. È costituito dal terreno presente in sito o, se questo non ha le proprietà corrette, da terreno selezionato. La sua corretta realizzazione è necessaria per garantire un'elevata durabilità della pavimentazione stradale e delle sue funzioni.

Le infrastrutture stradali dispongono di una vita utile e durante questo periodo di tempo sono sottoposte a diversi elementi che portano ad una progressiva perdita delle proprietà iniziali. I fattori principali sono:

- Agenti atmosferici (pioggia, neve, irraggiamento solare);
- Agenti climatici (cicli gelo – disgelo);
- Carichi ripetuti con forti sollecitazioni flessionali.

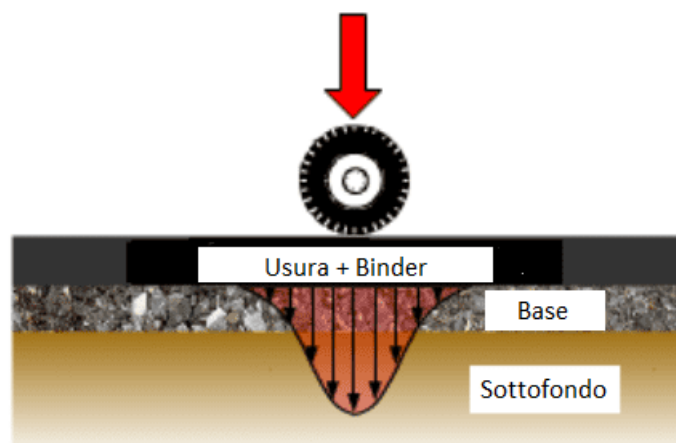


Figura 1.2: Carichi prodotti dallo pneumatico

La vita utile di una pavimentazione è definita come quel periodo di tempo al di là del quale, a causa del degrado prodotto dalle azioni del traffico e dagli agenti

atmosferici, non vengono più garantiti i requisiti funzionali e strutturali ed è necessario il rifacimento della pavimentazione. La vita utile di una pavimentazione viene calcolata dal momento di apertura al traffico dell'infrastruttura in questione. I manuali di progettazione consultati in ambito internazionale indicano periodi di esercizio in ogni caso superiori a 20 anni, non di rado pari a 30 prima che si renda necessario un intervento strutturale su una pavimentazione in calcestruzzo. [2]

Durante la vita utile devono essere mantenute le proprietà principali calcolate in fase di progetto e confermate durante il collaudo.

Per valutare nel tempo le condizioni dell'infrastruttura è stato introdotto dal *PMS (Pavement Management Systems)* un indice di condizione della pavimentazione denominato *PCI (Pavement Condition Index)*. Il PCI è un indicatore numerico di stato, normato in diverse edizioni dallo standard internazionale *ASTM D6433: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. Il PCI valuta lo stato di salute superficiale delle pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso e calcestruzzo tramite una scala numerica tra 0 e 100, in cui 100 è il valore relativo a pavimentazioni in perfetto stato, prive di dissesti o appena realizzate, caratterizzate da un elevato confort di guida e 0 è il valore relativo alla pavimentazione non percorribile.

| PCI (ASTM D6433) | VALUTAZIONE | CARATTERISTICHE |
|---------------------|---------------|---|
| 86 – 100 | BUONA | Pavimentazione nuova, strutturalmente solida |
| 71 – 85 | SODDISFACENTE | Pavimentazione strutturalmente solida Comparsa di lievi fessurazioni o usura superficiale |
| 56 – 70 | SUFFICIENTE | Pavimentazione strutturalmente solida Presenza di fessurazioni varie, usure e sgranamenti |
| 41 – 55 | MEDIOCRE | Presenza di dissesti strutturali, quali fessurazioni ramificate, depressioni, buche |
| 26 – 40 | SCADENTE | Pavimentazione decisamente ammalorata, superficialmente e strutturalmente |
| 11 – 25 | DEGRADATA | Pavimentazione diffusamente irregolare, prossima al termine del ciclo di vita utile |
| 0 – 10 | IMPRATICABILE | Pavimentazione non percorribile, non sicura, danni in tutti gli strati legati e nella fondazione |

Figura 1.3: Tabella valori PCI.

Nel caso in cui l'indice PCI abbia un valore molto basso è necessario eseguire una corretta manutenzione stradale. La manutenzione può essere un completo rifacimento della pavimentazione stradale o il rifacimento di un singolo strato.

Dal rifacimento della pavimentazione è possibile riciclare il conglomerato bituminoso degli strati superficiali; tale materiale prende il nome di fresato d'asfalto (o granulato di conglomerato bituminoso) dato che viene ottenuto mediante l'utilizzo di una fresa (scarifica pre-manutenzione/rifacimento).

Il riciclaggio del fresato si divide in due tipologie: a caldo o a freddo. Il riciclaggio a caldo prevede il riscaldamento degli inerti oltre i 150°C e consente di recuperare fino al 50% del fresato. Il riciclaggio a freddo invece prevede la miscelazione del fresato con il legante bituminoso, il cemento, l'acqua e altre inerti vergini, riuscendo a riciclare fino al 100% del prodotto.

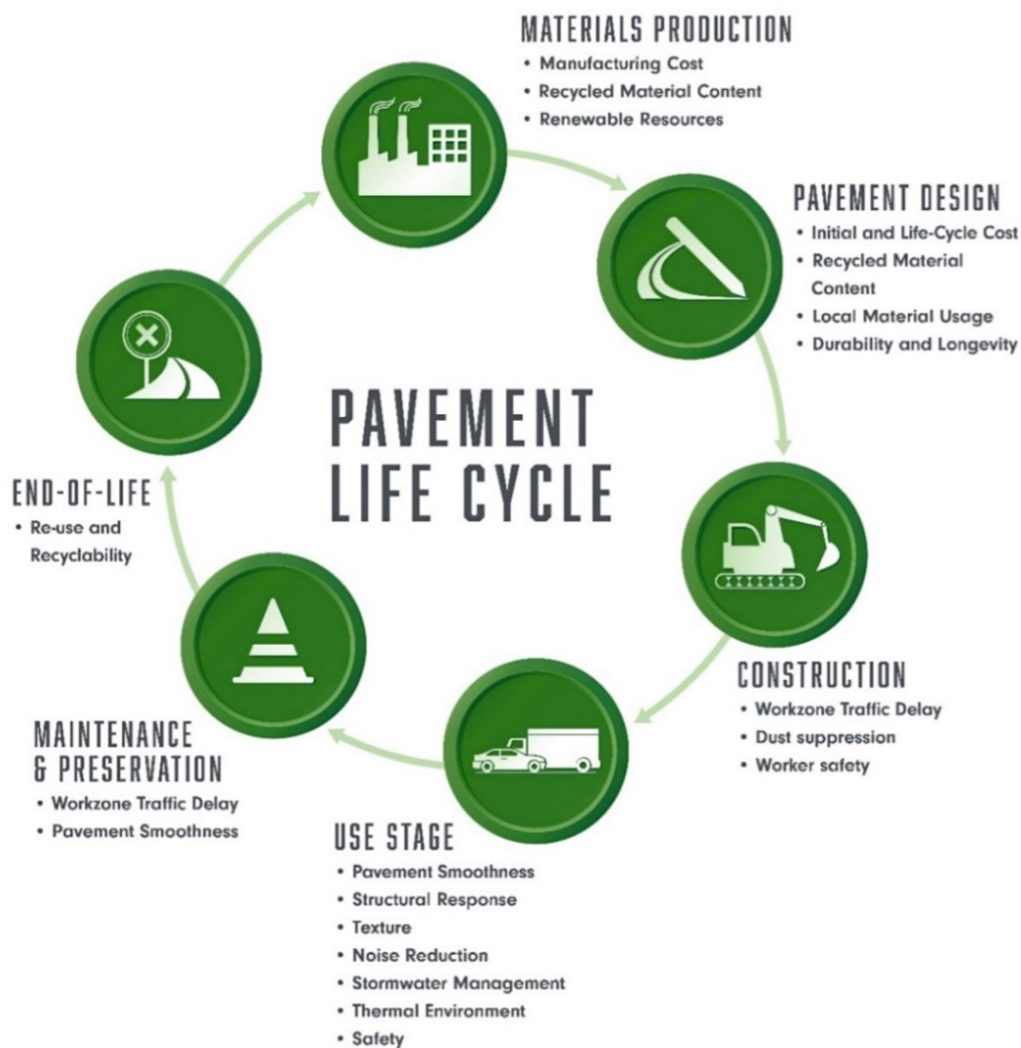


Figura 1.4: Ciclo di vita completo delle pavimentazioni stradali.

Il tema del riciclaggio negli ultimi anni è diventato di fondamentale importanza sia per una questione ambientale ed etica che per una questione economica. La realizzazione, l'apertura al traffico e il riciclo della pavimentazione stradale comportano un forte impatto ambientale con la produzione di anidride carbonica, gas inquinanti, polveri sottili e la combustione di energie fossili.

Il *Ministero dei Trasporti dell'Ontario (MTO- 2008)*, Canada, ha implementato un innovativo programma di riciclaggio della pavimentazione stradale per diminuire l'utilizzo di petrolio per la realizzazione del bitume e, soprattutto, per diminuirne l'impatto ambientale. Il metodo si basa su un riciclo a freddo eseguito sia con l'aggiunta di bitume schiumato (CIREAM) sia senza (CIR). Negli ultimi

17 anni il programma è stato applicato a 3.500.000 m² (circa 500 km di corsie autostradali) con l'obiettivo di:

- ottimizzare l'utilizzo delle risorse naturali;
- ridurre il consumo energetico;
- ridurre le emissioni di gas serra (GHG);
- limitare l'inquinamento;
- migliorare la salute, la sicurezza e la prevenzioni dei rischi;
- garantire un elevato livello di confort e sicurezza per l'utente.

La metodologia ha portato ad una riduzione dell'emmissioni di anidride carbonica e dei gas serra come ossido di diazoto (NO_x) e anidride solforosa (SO₂), la diminuzione si può notare nella *figura 1.5 e figura 1.6.* [5]

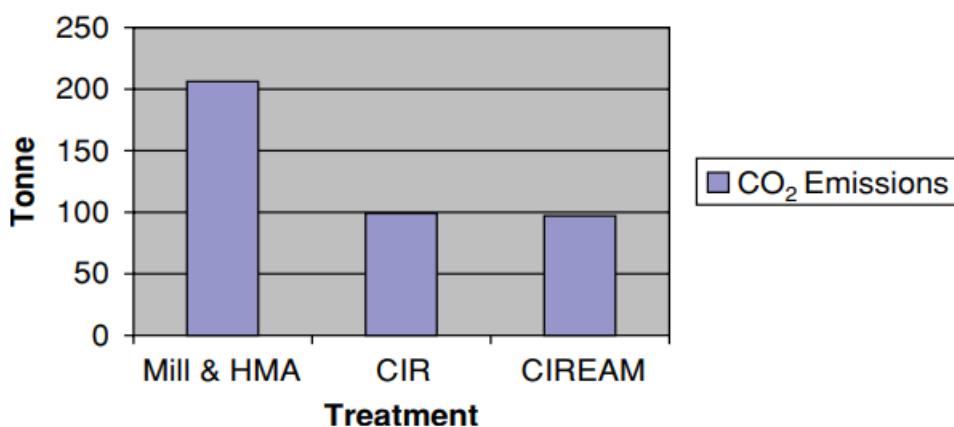


Figura 1.5: Grafico riduzione emissioni CO₂.

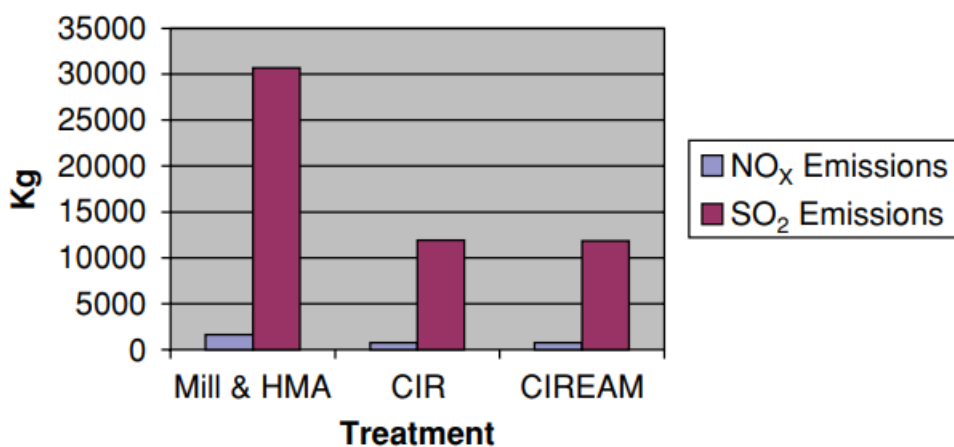


Figura 1.6: Grafico riduzione gas serra.

Lo studio eseguito dai ricercatori cinesi X. Chen e H. Wang per il *Journal of Cleaner Production* (2018) ha analizzato i principali vantaggi e svantaggi dal punto di vista ambientale ed economico nell'utilizzo del RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Con il termine RAP ci si riferisce al materiale ricavato, mediante fresatura, da una pavimentazione stradale esistente. Il riciclaggio dello strato superficiale favorisce il risparmio delle materie prime con la riduzione dell'estrazione e del trasporto del legante vergine. Inoltre, viene ridotto l'impatto ambientale dovuto al trattamento dei rifiuti solidi, evitando lo smaltimento del conglomerato bituminoso in discarica.

Gli studi hanno però evidenziato che gli aggregati presenti nel RAP, ottenuti mediante un riciclo a caldo, presentano un valore maggiore di umidità (3-6%) rispetto agli aggregati vergini (2-4%) dovuto, probabilmente, alla superiore età del rivestimento che impedisce l'evaporazione dell'acqua quando sono esposti all'aria.

Un ulteriore aspetto critico nell'utilizzo del conglomerato riciclato è l'azione dell'invecchiamento che può modificare drasticamente le prestazioni della pavimentazione e per questo motivo sono stati eseguiti vari esperimenti con miscele contenenti percentuali diverse di RAP visualizzando le variazioni delle caratteristiche reologiche.

È stato poi approfondito il metodo del *Life Circle Assessment (LCA)* che permette la valutazione delle pratiche sostenibili. Il metodo LCA viene utilizzato per quantificare l'impatto ambientale delle varie fasi del ciclo di vita della pavimentazione partendo dall'estrazione dei materiali e passando per il trasporto e per la manutenzione fino al fine vita.

Mediante l'utilizzo del LCA sulla pavimentazione stradale contenente percentuali diverse di RAP, si è potuta osservare una riduzione delle emissioni di gas serra (GHG), della produzione di CO₂ e dei consumi energetici. I risultati sono presentati nella *figura 1.7*.^[6]

| RAP Content | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | Blending Efficiency |
|------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|---------------------|
| GHG (ton) | 5922 | 5685 | 5449 | 5212 | 4976 | 4739 | |
| % Reduction due to RAP | 0% | 4.0% | 8.0% | 12.0% | 16.0% | 20.0% | 100% |
| GHG (ton) | 5922 | 5760 | 5597 | 5435 | 5273 | 5110 | |
| % Reduction due to RAP | 0% | 2.7% | 5.5% | 8.2% | 11.0% | 13.7% | 70% |
| GHG (ton) | 5922 | 5809 | 5696 | 5583 | 5470 | 5358 | |
| % Reduction due to RAP | 0% | 1.9% | 3.8% | 5.7% | 7.6% | 9.5% | 50% |

Figura 1.7: Variazione emissioni con percentuali di RAP differenti.

Risultati analoghi sono stati riscontrati nello studio dei ricercatori dell'*University of Illinois* (2014). Anche in questo studio è stato utilizzato il metodo LCA su miscele contenenti varie percentuali di RAP in modo da visualizzare le variazioni delle emissioni di gas serra e di energia utilizzata nel ciclo di vita completo della pavimentazione.

L'energia totale per la realizzazione della pavimentazione è dovuta, principalmente, all'estrazione dei materiali. Per questo motivo l'utilizzo del RAP comporta una forte diminuzione dell'energia totale per la costruzione e manutenzione dell'infrastruttura. I risultati presenti nella prima parte della *figura 1.8* evidenziano come all'aumentare della percentuale di RAP all'interno della miscela si ha una progressiva diminuzione del consumo di energia.

Dati simili sono stati riscontrati rispetto alle emissioni di anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), ossido di azoto (N₂O) e gas serra (GHG). Si hanno dei valori che differiscono in modo più lieve tra una miscela e l'altra ma confermando una tendenza decrescente all'aumentare del contenuto di RAP. ^[7]

| Life-cycle phase | Control | Mix with 30% RAP | Mix with 40% RAP | Mix with 50% RAP |
|--|-----------|------------------|------------------|------------------|
| Energy (MJ) | | | | |
| Construction | | | 600,333 | |
| Material | 6,543,635 | 6,021,140 | 5,846,975 | 5,672,810 |
| Total | 7,143,968 | 6,621,473 | 6,447,308 | 6,273,143 |
| Carbon dioxide, CO ₂ (kg) | | | | |
| Construction | | | 33,996 | |
| Material | 397,012 | 365,356 | 354,805 | 344,253 |
| Total | 431,007 | 399,352 | 388,800 | 378,248 |
| Methane, CH ₄ (kg CO ₂ e) | | | | |
| Construction | | | 4 | |
| Material | 76,892 | 70,889 | 68,889 | 66,888 |
| Total | 76,896 | 70,894 | 68,893 | 66,892 |
| Nitrous oxide, N ₂ O (kg CO ₂ e) | | | | |
| Construction | | | 34 | |
| Material | 3159 | 2903 | 2818 | 2733 |
| Total | 3193 | 2937 | 2852 | 2767 |
| GHG (kg CO ₂ e) | | | | |
| Construction | | | 34,033 | |
| Material | 479,556 | 441,442 | 428,738 | 416,033 |
| Total | 513,590 | 475,476 | 462,771 | 450,066 |

Figura 1.8: Risultati LCA sulle diverse miscele contenenti RAP.

1.2 Studi scientifici sulle prestazioni del fresato d'asfalto

Gli studi presentati in seguito fanno riferimento ad un riciclo del fresato a caldo definito “parziale”. Questo termine sta a significare che il fresato d'asfalto viene miscelato con altri elementi vergini e si ottiene in questo modo un composto costituito da:

- aggregati ottenuti dal fresato d'asfalto;
- aggregati vergini;
- bitume invecchiato ottenuto dal fresato d'asfalto;
- bitume vergine;
- additivi ringiovanenti per ripristinare le prestazioni del bitume invecchiato.

I principali studi si interrogano sulla quantità adatta di ringiovanente da utilizzare all'interno delle miscele contenenti RAP e di come questi additivi variano le caratteristiche reologiche del bitume e aggregati.

Si precisa che le ricerche analizzate fanno riferimento a studi condotti sia a livello di legante (“binder-scale”), che prevedono l'additivazione a livello di legante (composto) – tecnologia denominata “wet” – sia a livello di miscela (“mix-scale”), che prevedono l'additivazione direttamente a livello di miscela (conglomerato bituminoso) – tecnologia denominata “dry”.

Di seguito si illustrano alcune esperienze scientifiche riguardanti l'argomento, aventi come oggetto lo studio del legante bituminoso (composto bituminoso) impiegato per la composizione di miscele riciclate contenenti fresato (tecnologia di tipo "wet").

Nella ricerca condotta da Wang et al. (2008) sono studiate le variazioni delle caratteristiche reologiche di composti contenenti RAP e ringiovanente. La percentuale di fresato d'asfalto all'interno della miscela finale (conglomerato bituminoso) è limitata tra il 25-50% a causa dell'invecchiamento del bitume che, avendo una maggiore rigidità e fragilità rispetto al legante vergine, implica una minore resistenza a fessurazione.

L'utilizzo del ringiovanente, oltre a limitare gli effetti dell'invecchiamento del bitume, permette l'impiego di un quantitativo superiore di fresato riciclato, aumentando il livello di riciclaggio.

La sperimentazione è stata svolta mediante la cooperazione di più laboratori ingegneristici di varie università mondiali (RILEM TC 264 RAP). Inizialmente è stato estratto mediante Tricloroetilene (Normativa EN 12697-1 e EN 12697-3) il bitume invecchiato dal RAP. A quest'ultimo è stato aggiunto un 8% di ringiovanente a base biologica e un bitume vergine con penetrazione pari a 50/70 (EN 1426), in modo tale da ottenere un composto bituminoso avente o il 60% (60RA), 80% (80RA) o 100% (100RA) di legante ringiovanito e la restante percentuale di bitume vergine.

Nella *figura 1.9* è possibile osservare i risultati dei diversi laboratori nelle prove di penetrazione e rammollimento eseguiti su composti bituminosi RA80, o contenenti solo legante vergine. La prova è stata ripetuta dopo un invecchiamento del composto sia a breve che a lungo termine dei composti bituminosi.

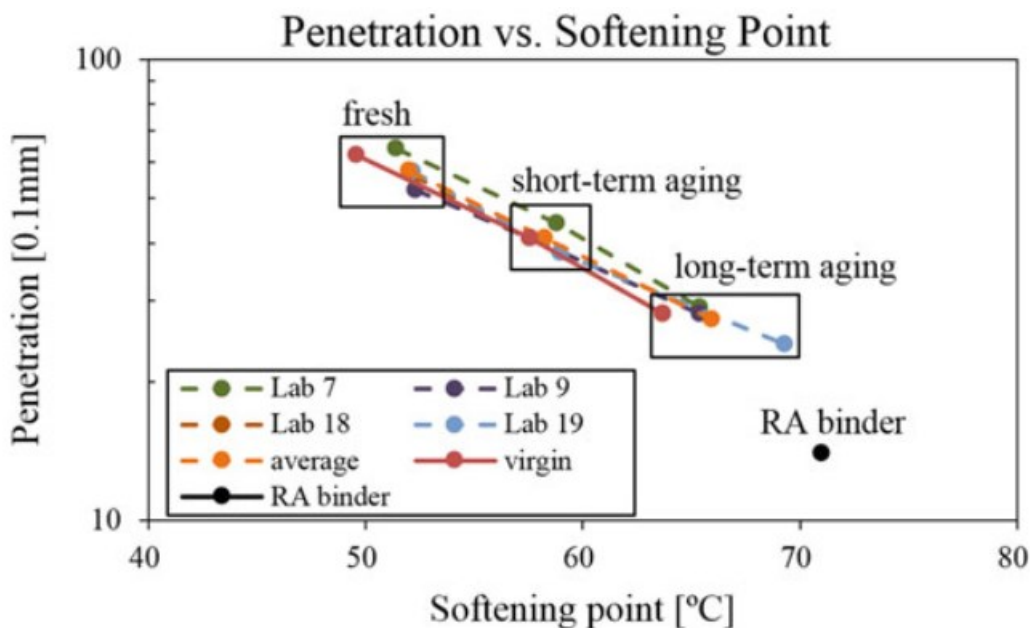


Figura 1.9: Risultati Prova di Penetrazione e Rammollimento.

Dalla figura si può notare come la differenza dei risultati tra i vari laboratori sia minima. Inoltre, valori simili sono stati riscontrati nei composti bituminosi RA60 e RA100 indicando che il contenuto ottimale di ringiovanente permette di ripristinare la consistenza del bitume a 25°C e ad alte temperature. È possibile affermare che l'invecchiamento di RA80 e del bitume vergine è simile.

Infine, i composti bituminosi sono stati sottoposti a test con reometro a taglio dinamico (DSR – Dynamic Shear Rheometer) per valutarne le risposte tenso-deformative e ottenere il modulo complesso di rigidità G^* . La prova è stata impostata, inizialmente, ad una temperatura di 28°C con una frequenza di 1,59 Hz e poi a 58°C con la medesima frequenza. I risultati ottenuti sono rappresentati nella figura 1.10.

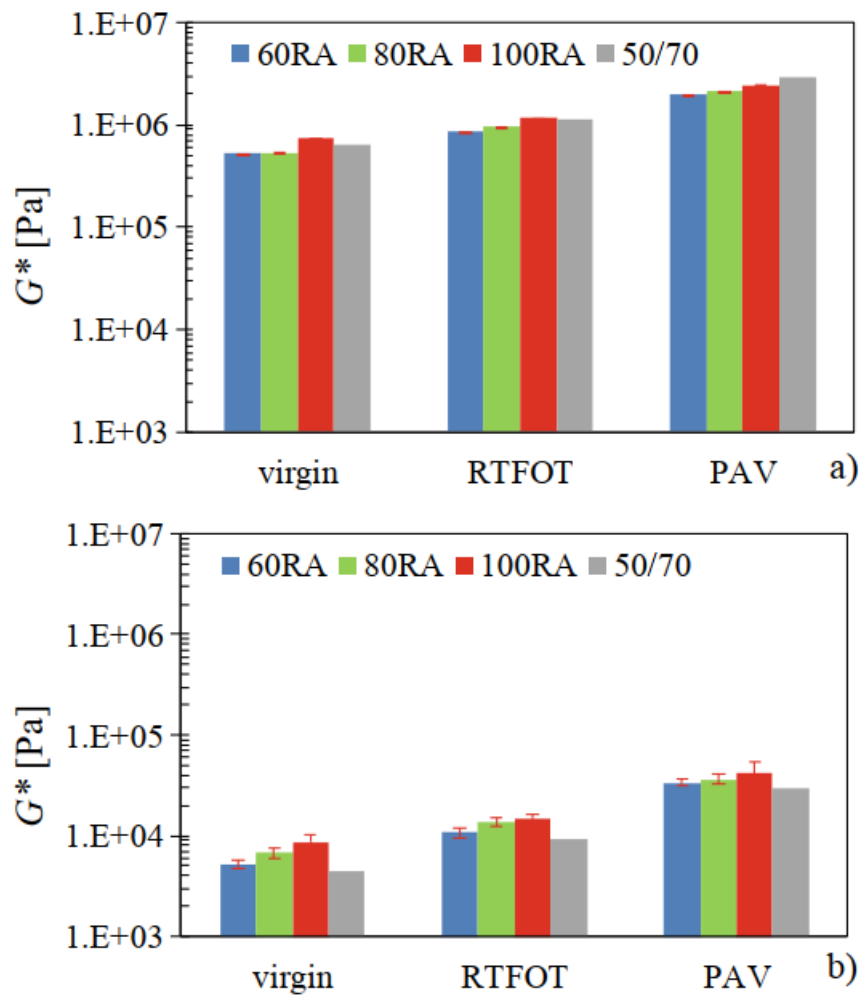


Figura 1.10: Risultati DSR, a) 28°C e b) 58°C.

Si può notare come il modulo complesso dei composti contenenti ringiovanente è minore rispetto a quello del legante vergine quando la prova è eseguita a 28°C. Andamento opposto si ha a 58°C con valore del modulo complesso maggiore nei composti contenenti bitume proveniente dal fresato. [8]

Il professore Connor R. Dugan dell'University of Oklahoma (2020) ha eseguito, insieme ai suoi ricercatori, uno studio riguardante l'utilizzo di ringiovanente proveniente dall'olio vegetale riciclato (WCO) all'interno di un composto contenente RAP. Lo scopo dello studio era osservare le caratteristiche reologiche di un legante contenente bitume da fresato riciclato, bitume vergine e WCO.

L'analisi è stata fatta su una composti contenenti percentuali del 40% o del 60% di bitume ottenuto dal RAP, binder vergini P64-22 e ringiovanenti provenienti da

differenti fonti, come abitazioni o ristoranti, e con caratteristiche differenti date dal precedente utilizzo.

Sui campioni, è stata realizzata la prova di viscosità (*figura 1.11*) e i risultati hanno evidenziato che il composto contenente il ringiovanente ha valori pressochè identici a quello di confronto, con solo bitume vergine. Bassi valori di viscosità permettono un maggiore rivestimento dell'aggregato e una lavorazione della miscela a temperature più basse, che porta ad una riduzione del fabbisogno energetico. I valori ottenuti dimostrano che il mancato utilizzo di ringiovanente può portare ad una bassa viscosità della miscela contenente RAP (difatti il campione avente il 60% di fresato ha i risultati peggiori).

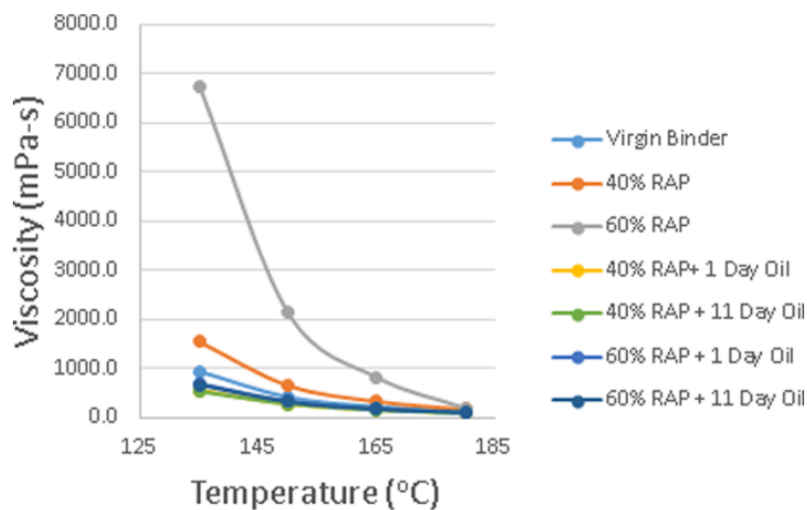


Figura 1.11: Risultati prova di viscosità (RV).

Sui leganti si sono poi eseguite prove DSR con l'obiettivo di determinare se il ringiovanente alteri il comportamento del legante. I risultati, osservabili in *figura 1.12*, hanno evidenziato come l'utilizzo di bitume proveniente dal RAP aumenti la rigidità del composto, mentre la presenza di ringiovanente permette una mitigazione di tali valori.

In entrambe le prove è stato osservato che l'utilizzo di un ringiovanente maggiormente datato (11 giorni) produce dei risultati migliori sia nel composto contenente 40% di bitume proveniente dal RAP, sia in quello contenente il 60%.

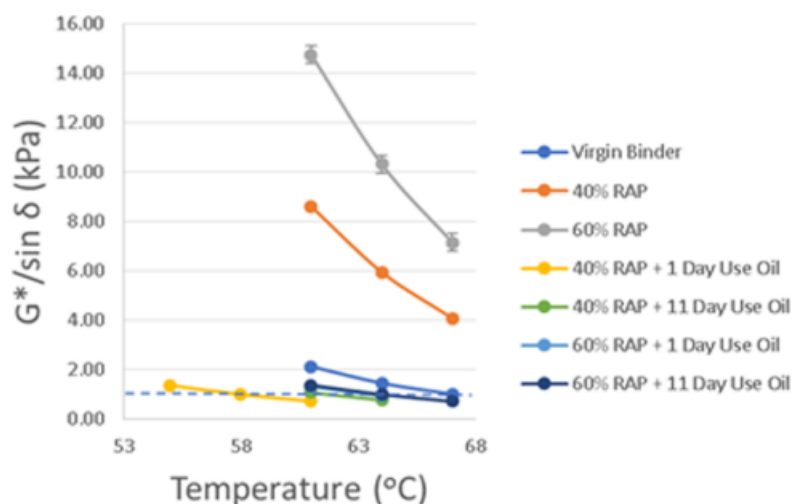


Figura 1.12: Risultati prova di DSR.

Infine, si sono eseguiti test con il Bending Beam Rheometer - BBR (EN 14771) per determinare la resistenza alla fessurazione dei leganti alle basse temperature (figura 1.13).

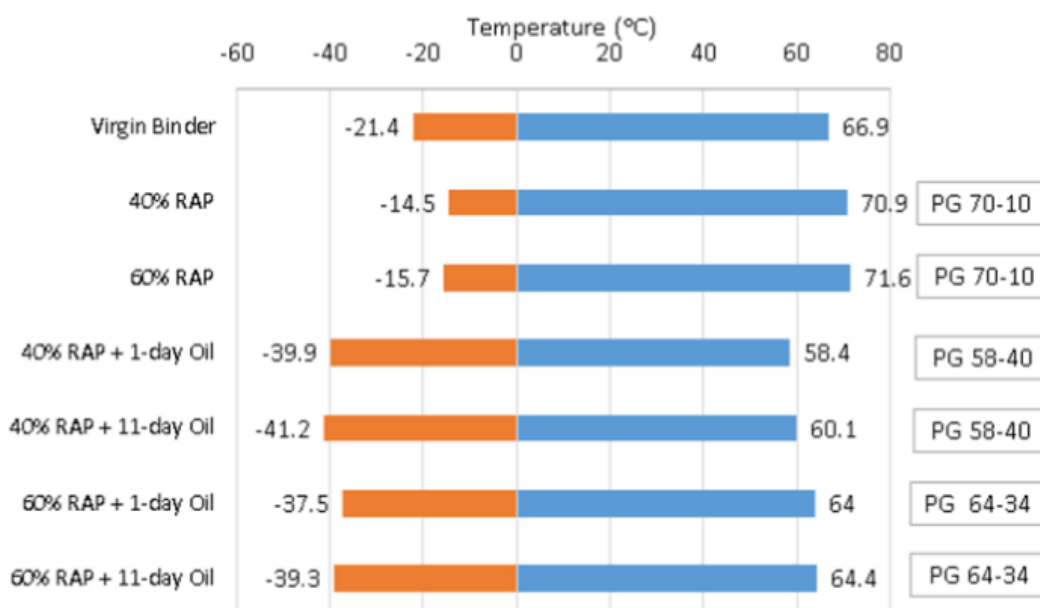


Figura 1.13: Risultati prova BBR.

Anche la seguente prova ha confermato che l'aggiunta del ringiovanente permette una maggiore resistenza delle miscele alle basse temperature, sia rispetto al composto di riferimento, sia rispetto a quello contenente solo il bitume estratto dal RAP. Si osserva che il valore del Performance Grade - PG (AASHTO MP 19-13) non varia all'aumentare dei giorni del ringiovanente utilizzato. [9]

Lo studio condotto da Cavalli et al. (2018) Ha avuto lo scopo di caratterizzare e comprendere gli effetti dell'invecchiamento di bitume da RAP modificato con tre ringiovanenti differenti (A, B, C) e l'aggiunta di bitume vergine 50/70. Il bitume riciclato è stato recuperato da una pavimentazione in Svizzera. Il ringiovanente A è ottenuto da un olio di semi, il B da olio di anacardi e il C da olio estratto dalle conifere.

Sui composti realizzati sono state eseguite due prove DSR: una con i campioni non invecchiati e una con i campioni invecchiati, che hanno fornito i risultati esposti in *figura 1.14* e in *figura 1.15* rispettivamente.

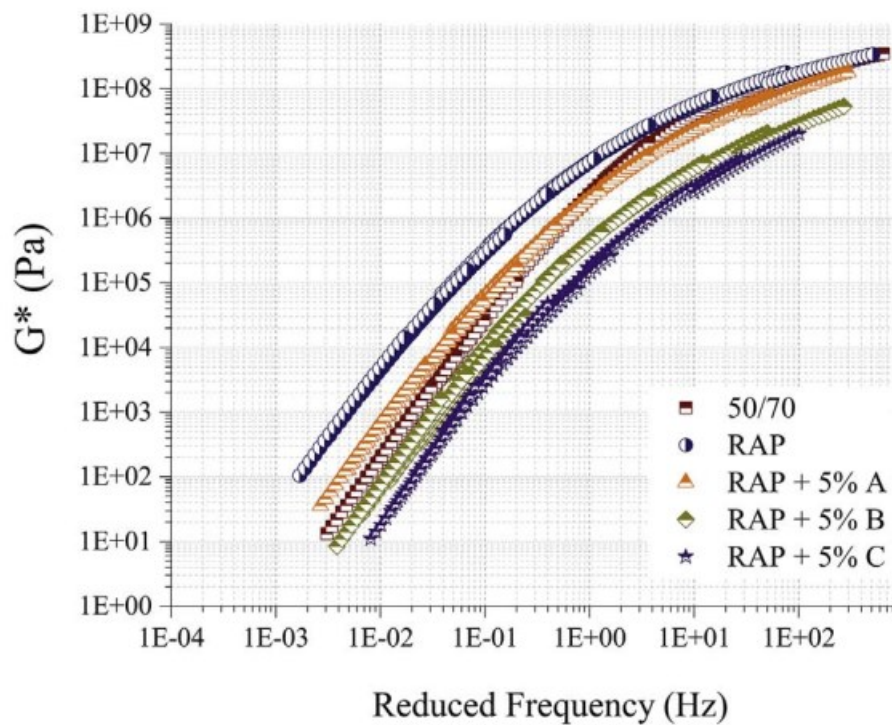


Figura 1.14: Risultati DSR bitumi non invecchiati.

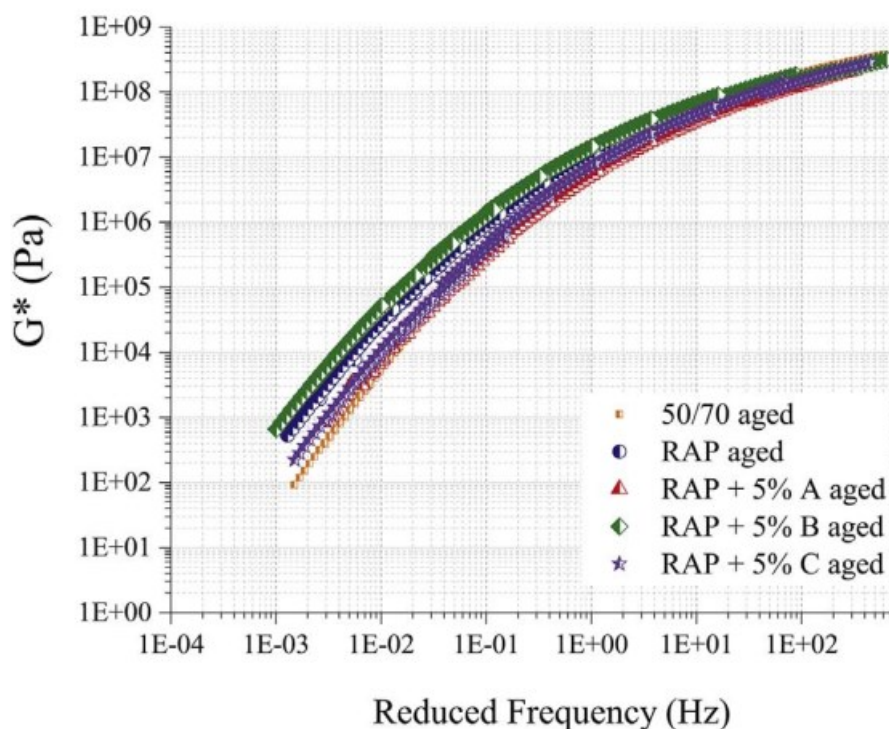


Figura 1.15: Risultati DSR bitumi invecchiati.

La figura 1.14 evidenzia come il legante avente al suo interno il ringiovanente B o C abbia moduli di rigidezza minori rispetto al legante vergine.

Se il legante viene invecchiato, la prova DSR dimostra valori maggiori rispetto alla precedente con le miscele aventi ringiovanente A e C, che hanno valori molto simili ai precedenti ed evidenziano una migliore risposta alle azioni del tempo.

Lo studio ha quindi evidenziato che, al variare del tipo di ringiovanente utilizzato, le risposte del legante sono differenti, e la scelta della migliore tipologia di additivo dipende da svariati fattori. ^[10]

Il Dipartimento di Ingegneria Civile del *Iowa State University* (2021) ha eseguito uno studio di laboratorio per determinare il dosaggio ottimale di ringiovanente all'interno di diverse tipologie di leganti. È stata simulata una miscela contenente il 30% di RAP, con all'interno un ringiovanente biologico a base di metil soiato epossidato (EMS) e un legante vergine con PG 58-28S. Il composto bituminoso corrispondente contiene il 75,5% di bitume vergine, 24,5% di bitume estratto dal fresato di asfalto e 3% di EMS, pari al 0,126% del peso totale. In seguito, è stato

realizzato e steso un conglomerato bituminoso su un tratto di strada di 1/3 di miglia nello Stato dello Iowa per eseguire ulteriori studi.

Lo scopo della ricerca era visualizzare le prestazioni del ringiovanente biologico e le caratteristiche reologiche della miscela eseguendo la prova DSR e fatica. Per eseguire la seconda prova un campione di pavimentazione è stato estratto mediante carotaggio e riportato in laboratorio per svolgere il test. I valori ottenuti sono stati paragonati con quelli di una miscela di controllo senza RAP e ringiovanente.

I risultati ottenuti sono visualizzati nella *figura 1.16* e *figura 1.17*.

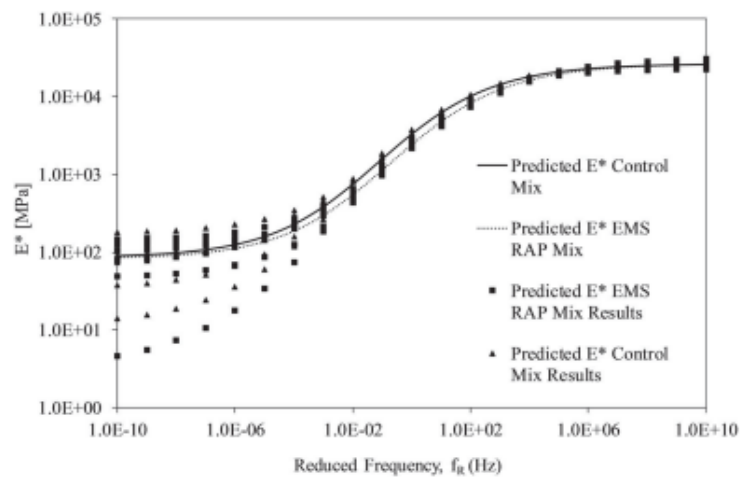


Figura 1.16: Risultati della prova DSR, confronto tra miscela.

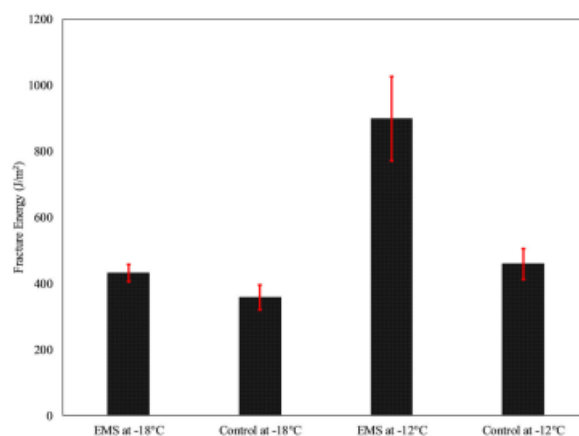


Figura 1.17: Risultati della prova a fatica, confronto tra miscela.

Come si può osservare si ha una differenza minima nella prova DSR tra il bitume contenente ringiovanente e il bitume della miscela di controllo portando a dire che

il contenuto di ringiovanente è corretto. Risultato analogo si ha nella prova a fatica in cui alla temperatura di -12°C si ha una maggiore resistenza della miscela contenente ringiovanente rispetto a quella di controllo. In modo analogo a -18°C il risultato viene confermato. ^[11]

I ricercatori polacchi della *Silesian University of Technology* (2020) hanno eseguito uno studio su quattro tipologie di leganti bituminosi:

- bitume 35/50 (bitume originale della pavimentazione in esame);
- bitume estratto dal RAP (dopo vita utile pari a 11 anni);
- bitume 35/50 invecchiato mediante metodo RTFOT (EN 12607-1);
- bitume 35/50 invecchiato mediante metodo RTFOT (EN 12607-1) + PAV (EN 14769).

Su questi campioni sono state eseguite le prove di rammollimento e penetrazione secondo la normativa vigente (EN 1427:2015-08 e EN 1426:2015-08) ottenendo i risultati esposti in *figura 1.18*.

| Property | Standard | Original binder (used to produce the mixture in 2006) | Reclaimed binder (from pavement trafficked for 11 years) | Original binder after RTFOT (according to [30]) | Original binder after RTFOT+PAV (according to [30]) |
|--|-----------------|---|--|---|---|
| Penetration (PEN), (25°C, 100 g, 5 s) [$\times 0.1$ mm] | EN 1426:2015-08 | 45 | 25 ± 2.1 | 31 | 18 |
| Softening point (TR&B), (5°C/min) [°C] | EN 1427:2015-08 | 54 | 60 ± 0.4 | 59 | 69 |

Figura 1.18: Risultati prova di penetrazione e rammollimento, Silesian University of Technology.

I risultati dimostrano che il bitume ottenuto dal RAP ha un'elevata rigidità dovuta al fenomeno dell'invecchiamento.

Per migliorare le prestazioni del bitume ricavato dal fessato riciclato, i ricercatori hanno poi realizzato composti bituminosi contenenti ringiovanenti di origine differente, in diversa percentuale:

- D1, distillato di petrolio riraffinato;
- D2, resine vegetali ecocompatibili;

- D3, bitume molto “morbido” utilizzato in pavimentazioni ad elevato traffico leggero;
- D4, imidazolina (grasso di origine animale).

Con i materiali descritti si sono quindi confezionati diversi conglomerati bituminosi allo scopo di eseguire prove di contenuto dei vuoti, rigidità, ormaiamento, rigidità, fatica e sensibilità all’acqua.

In *figura 1.19* si può osservare come aumentando la percentuale di ringiovanente (tra 0 e 0,8% rispetto al peso del RAP utilizzato nella miscela) si ha una diminuzione del contenuto dei vuoti con andamento decrescente per le miscele aventi additivi D2-D4. Le miscele contenenti additivi D1-D4 hanno un punto di minimo con una percentuale di ringiovanente pari a 0,6% probabilmente dovuto alla differente viscosità dei ringiovanenti stessi.

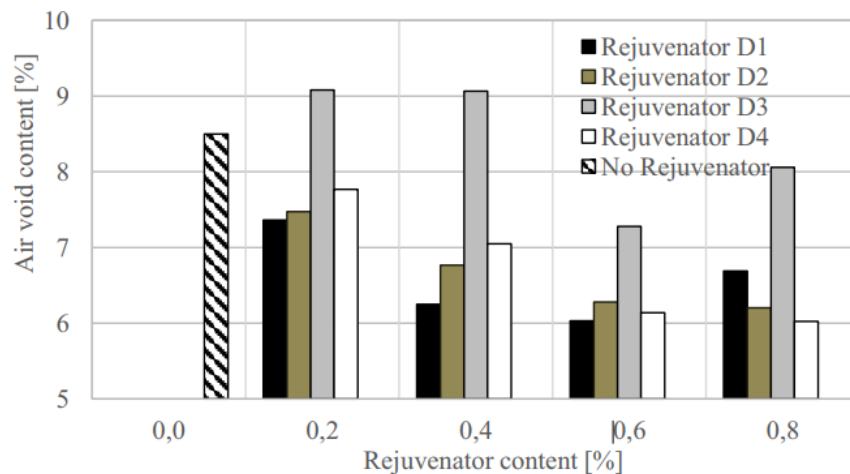


Figura 1.19: Percentuale contenuto vuoti al variare del contenuto di ringiovanente.

Sia la prova di ormaiamento (*figura 1.20*) che quella di rigidità (*figura 1.21*), eseguite secondo normativa EN 12697-22:2008 e EN 12697-26:2012 hanno definito che all’aumentare della percentuale di ringiovanente si ha un aumento delle prestazioni della miscela. Il ringiovanente D1, nella prova di ormaiamento, è il solo a non avere andamento totalmente crescente.

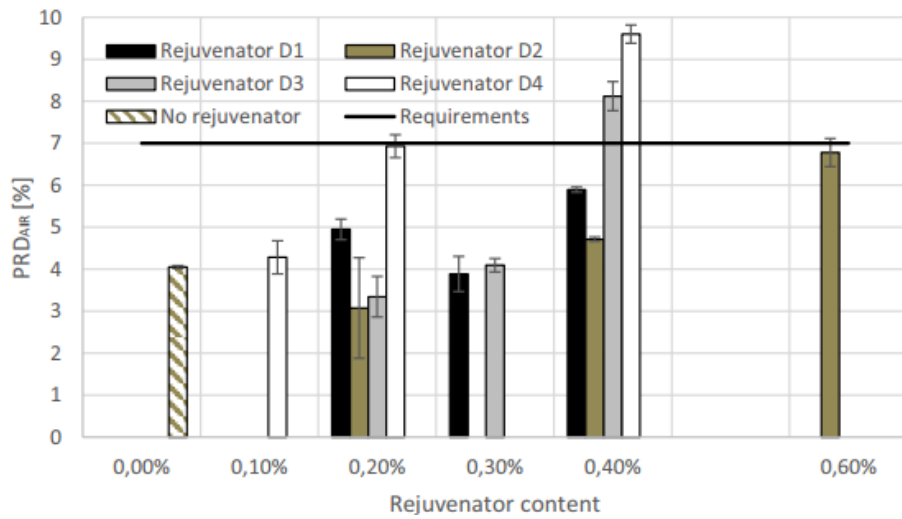


Figura 1.20: Risultati prova di ormaiamento al variare della percentuale di ringiovanente.

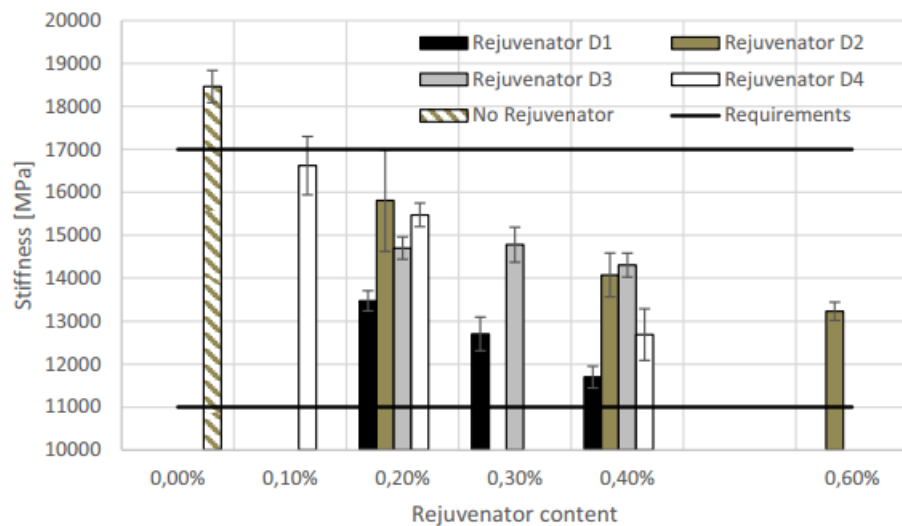


Figura 1.21: Risultati prova di rigidità al variare della percentuale di ringiovanente.

La prova a fatica, eseguita mediante flessione su 4 punti del provino di conglomerato bituminoso EN 12697-24, ha evidenziato valori molto variabili tra le diverse tipologie di ringiovanente (figura 1.22). La prestazione migliore è stata eseguita dal ringiovanente D2-D4 al 0,4% ma per le miscele contenenti additivi D1-D3 si ha avuto un valore massimo al 0,3%. Si noti che i valori sono altamenti più elevati della miscela contenente bitume vergine.

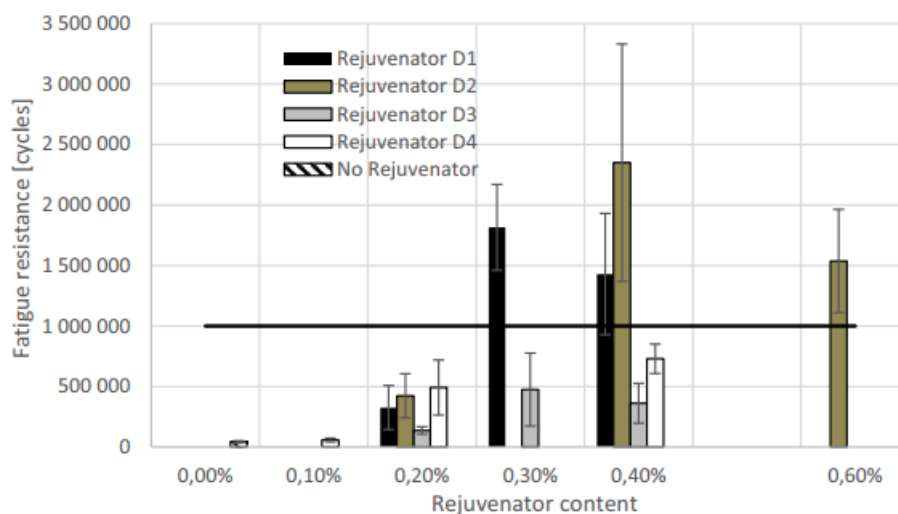


Figura 1.22: risultati prova a fatica al variare del contenuto i ringiovanente.

Infine, la prova di sensibilità all’acqua (EN 12697-12) eseguita mediante il test ITS (*Indirect Tensile Streght*) ha definito, come si osserva in figura 1.23, che l’utilizzo del ringiovanente di qualsiasi natura comporta un aumento della resistenza all’acqua del conglomerato bituminoso. [12]

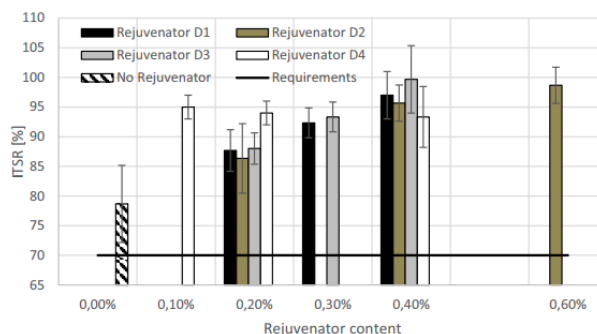


Figura 1.23: Risultati prova di sensibilità all’acqua al variare della percentuale di ringiovanente.

Di seguito si illustrano alcuni studi eseguiti a scala di miscela (tecnologia “dry”).

La quantità adeguata di ringiovanente sul fresato di asfalto riciclato è stata investigata dai ricercatori dell’*Università di Padova* (M. Pasetto et al. 2022). Lo scopo dello studio era realizzare molteplici miscele contenenti ringiovanente in diverse quantità e verificare come le caratteristiche del conglomerato bituminoso invecchiato variassero.

L'invecchiamento è stato realizzato in laboratorio mediante STA (Short-Term Aging) e LTA (Long-Term Aging) e il processo è stato eseguito più volte sulle medesime miscele con l'aggiunta in alcune di ringiovanente come illustrato in *figura 1.24*.

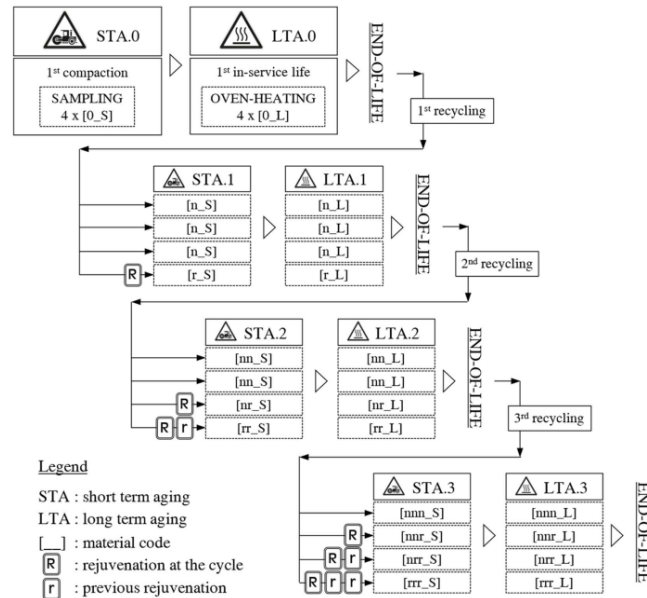


Figura 1.24: Processo di invecchiamento e aggiunta di ringiovanente nelle miscele.

Dopo aver realizzato un primo set di provini mediante l'utilizzo di bitume 50/70 e di aggregati di calcare, il processo di riciclaggio è stato eseguite in tali fasi:

- Compattazione delle miscele realizzando due tipi di campioni: uno cilindrico e uno prismatico (EN 12697-33 e EN 12697-31);
- Invecchiamento a breve termine (durante la compattazione) e raffreddamento di un giorno a temperatura ambiente, test sul campione;
- Invecchiamento lungo termine mediante forno impostato a 85°C per 120 ore, test sul campione.
- Aggiunta di ringiovanente alle miscele (nomenclatura contenente il carattere r).

Il ciclo è stato ripetuto per 3 volte e sono state realizzate le prove di rigidità e ITS con i risultati riportati in *figura 1.25* e *figura 1.26*.

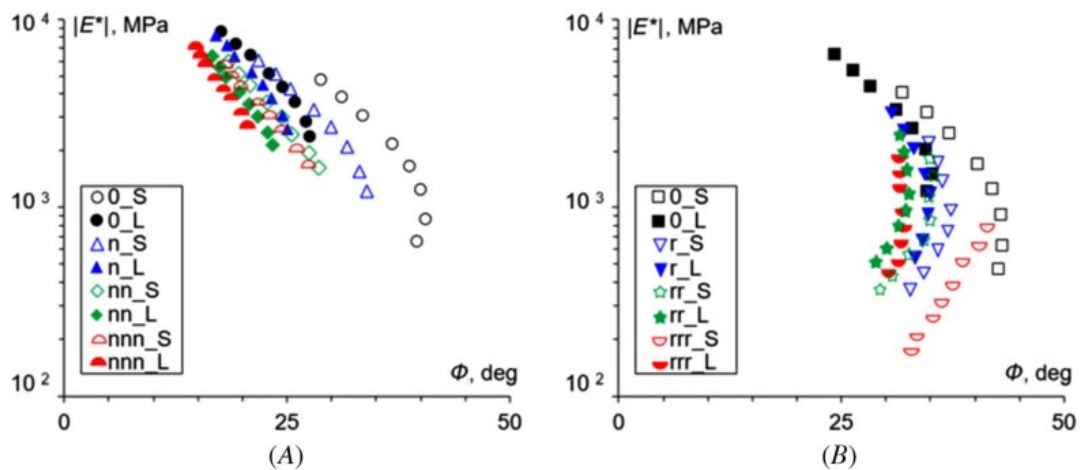


Figura 1.25: Risultati di rigidezza delle differenti miscele.

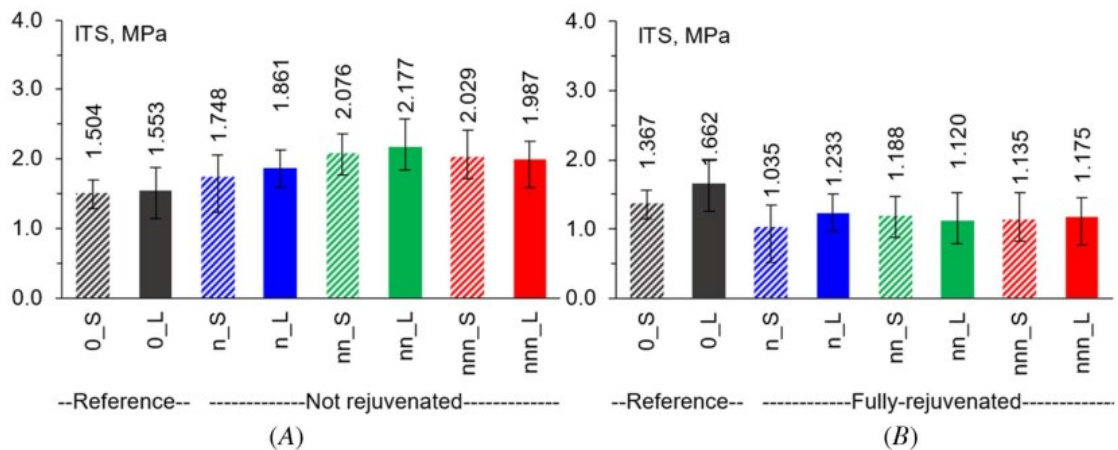


Figura 1.26: Risultati ITS differenti miscele.

I risultati della prova DSR evidenziano che nelle miscele senza ringiovanente ogni processo di riciclaggio comporta un aumento della rigidezza e una riduzione della viscosità sia con l'invecchiamento di breve periodo che di lungo periodo. I valori ottenuti dalla prova ITS hanno fatto osservare un aumento della resistenza a trazione del materiale a partire dal secondo ciclo di ringiovanente e ciò significa che l'additivo comporta un miglioramento delle prestazioni.

I dati ottenuti, se confrontati con i risultati delle miscele di riferimento, presentano valori nettamente inferiori, ma è da tenere presente che quest'ultime non subiscono nessun ciclo. Infine, i ricercatori hanno evidenziato che è necessario individuare la giusta quantità di ringiovanente dato che un eccesso o una carenza

di esso comporta una variazione delle caratteristiche del materiale, portando ad una minore resistenza e a difetti della miscela. [13]

I ricercatori della *Qatar University* (2018) hanno eseguito uno studio su un conglomerato bituminoso composto da aggregati vergini, da aggregati provenienti dal RAP, da un 5% di bitume estratto dal fresato e il restante è bitume vergine PG 64-22. Sono state realizzate tre miscele con differenti ringiovanenti: SM contenente nessun ringiovanente, CM contenente ringiovanente commerciale e WM contenente ringiovanente riciclato ottenuto dall'olio motore.

Sono stati realizzati vari campioni con percentuali diverse di RAP al suo interno e il contenuto di ringiovanente aumenta all'aumentare del fresato.

Sui diversi campioni, previa compattazione, è stata realizzata la prova di trazione indiretta ITS (*figura 1.27*) e la prova di resistenza dinamica MS (*figura 1.28*).

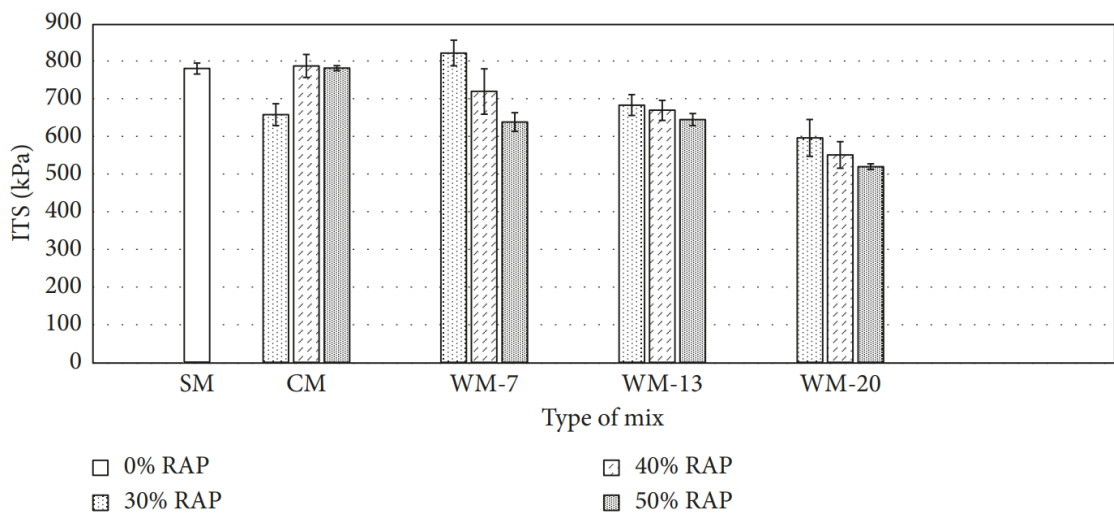


Figura 1.27: Risultati prova ITS.

La prova a trazione indiretta ha complessivamente evidenziato una diminuzione del valore ITS all'aumentare della percentuale di RAP. Un utilizzo elevato di fresato può portare a legami non omogenei tra gli elementi vergini con valori di ITS più bassi.

L'utilizzo di ringiovanente WM-7 mostra una significativa diminuzione del valore ITS sulle miscele contenente più del 40% del RAP rispetto ai composti con gli

altri ringiovanenti. Invece, le miscele con ringiovanente WM-13 e WM-20 hanno valori pressochè costanti alle diverse percentuali di fresato.

I risultati più elevati sono stati ottenuti con l'additivo CM che mantiene valori elevati anche al variare della percentuale di RAP.

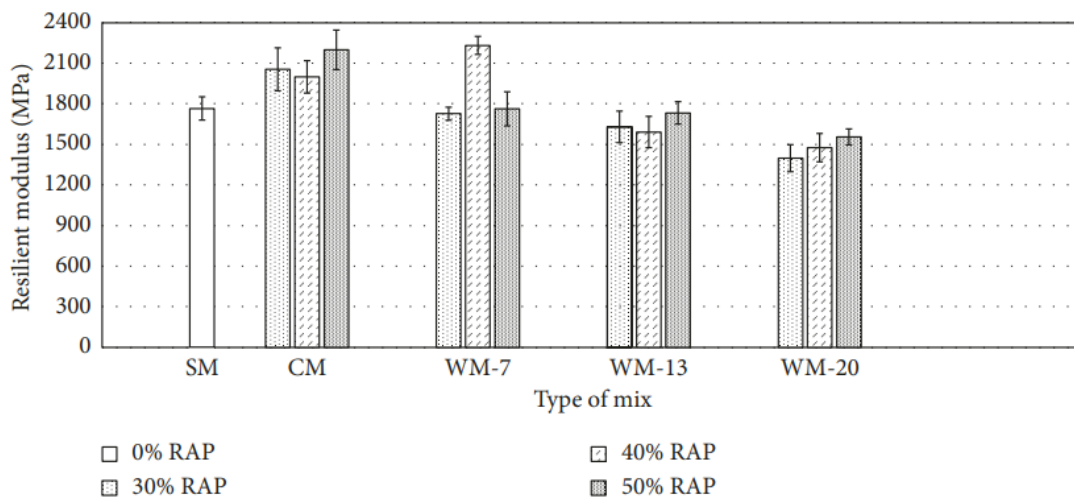


Figura 1.28: Risultati prova resistenza dinamica.

I risultati complessivamente evidenziano risultati maggiori delle miscele SM e CM rispetto alle altre. Come nella prova ITS i valori maggiori sono stati ottenuti dal composto con il ringiovanente commerciale. La miscela WM-7, se contenente una percentuale di RAP maggiore al 40%, presenta un decremento del valore del modulo. Il composto con un elevato quantitativo di olio motore al suo interno presenta una diminuzione dei risultati.

Lo studio ha ulteriormente confermato come l'utilizzo di ringiovanenti provenienti da origini differenti comporti una variazione delle prestazioni reologiche delle miscele. Inoltre, se il quantitativo di additivo non è corretto si hanno diversi risultati nelle varie prove.^[14]

Sulla base di quanto descritto risulta evidente che la letteratura scientifica di settore tratta l'argomento del riciclaggio a caldo da diversi punti di vista (caratteristiche del bitume invecchiato, ottimizzazione della quantità di ringiovanenti, prestazioni dei leganti e delle miscele, ecc.). I principali risultati

sperimentali sono spesso variegati, in considerazione delle svariate peculiarità che influenzano le singole ricerche (caratteristiche del fresato impiegato, tipologia di miscela, proprietà del ringiovanente, quantità di fresato riciclato, ecc.); per tale motivo si ritiene valida la necessità di approfondire lo studio di tale tecnologia di riciclaggio per il confezionamento di miscela stradali ottimizzate, in grado di garantire adeguate prestazioni in esercizio. Particolare attenzione, in tale ambito, sembra meritare lo sviluppo di modalità tanto speditive quanto efficaci per la determinazione ottimale del quantitativo di ringiovanente da impiegare.

CAPITOLO 2

Riciclaggio a caldo, RAP e ringiovanente

Il seguente capitolo ha lo scopo di elencare le diverse metodologie utilizzate per il riciclaggio a caldo del fresato di asfalto e descrivere nel dettaglio il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Infine, vengono descritti i metodi di invecchiamento a breve e lungo termine e i vari additivi ringiovanenti utilizzati per riportare le caratteristiche della miscela allo stato iniziale.

2.1 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) e metodi di riciclo

Con il termine RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) si intende il conglomerato bituminoso riciclato ottenuto mediante fresatura della pavimentazione esistente.

Il processo di fresatura consiste nell'asportare uno o più strati della pavimentazione stradale con la finalità di posizionare nuovi strati aventi caratteristiche migliori rispetto ai precedenti. La fresatura avviene mediante l'utilizzo di una fresa meccanica composta da più rotori (*figura 2.1*) che permettono di rompere lo strato superficiale e raccogliere il materiale.



Figura 2.1: Fresatrice meccanica.

I rotori della fresatrice sono composti da “denti” in acciaio (*figura 2.2*) che permettono mediante la rotazione la frantumazione dello strato superficiale della pavimentazione stradale e, contemporaneamente, una prima miscelazione a freddo del materiale ottenuto (*figura 2.3*).

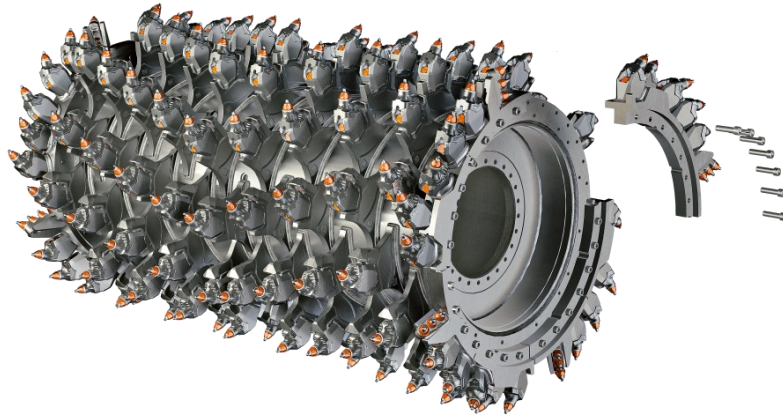


Figura 2.2: Rotori dentati della macchina fresatrice.

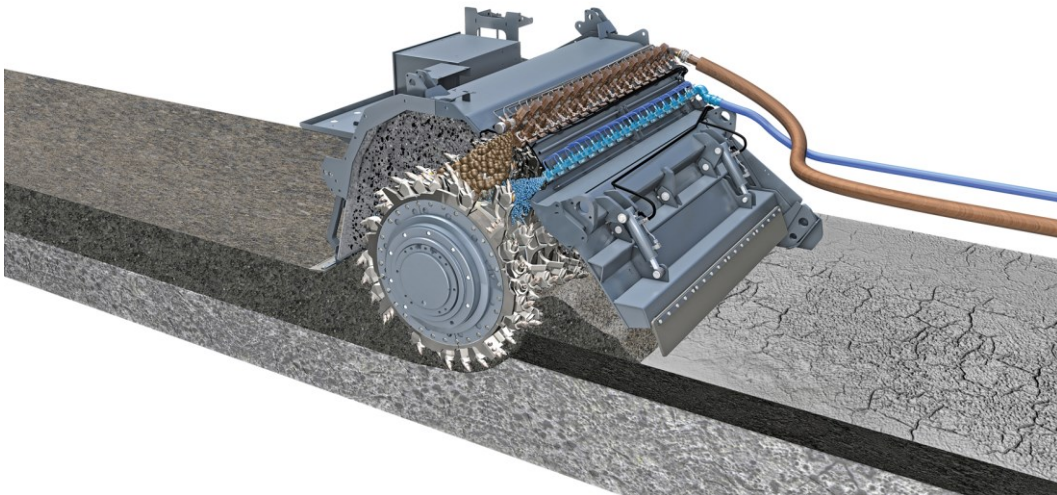


Figura 2.3: Processo di fresatura e miscelazione della pavimentazione stradale.

L'associazione italiana SITEB (Strade Italiane e Bitumi) monitora il quantitativo di fresato riutilizzato dai diversi paesi europei ed extraeuropei a partire dal 2010.

L'Italia pur essendo uno dei paesi con il maggior quantitativo di conglomerato bituminoso di recupero disponibile, circa 11.000.000 tonnellate, ha un quantitativo di riutilizzo pari a circa il 20%. Stati europei con quantitativi minori come Austria, Olanda e Svezia hanno una percentuale di riutilizzo pari a circa 80%, come si può notare dalla *figura 2.4*.

| Paese | Conglomerato Bituminoso di recupero disponibile (t) | Utilizzo nella produzione di cb a caldo (%) |
|----------------|---|---|
| Austria | 500.00 | 80 |
| Belgio | 1.500.000 | 57 |
| Cecoslovacchia | 1.650.000 | 15 |
| Croazia | 75.000 | - |
| Danimarca | 350.000 | 56 |
| Finlandia | 1.000.000 | - |
| Francia | 7.080.000 | 40 |
| Germania | 14.000.000 | 82 |
| Gran Bretagna | 4.000.000 | - |
| Ungheria | 44.000 | 12 |
| Islanda | 15.000 | - |
| Irlanda | 100.000 | 40 |
| Italia | 11.000.000 | 20 |
| Olanda | 4.000.000 | 75 |
| Norvegia | 750.000 | 15 |
| Polonia | 110.000 | 4 |
| Romania | 40.000 | 40 |
| Slovenia | 26.160 | 30 |
| Spagna | 1.590.000 | 56 |
| Svezia | 1.100.000 | 70 |
| Svizzera | 1.450.000 | 52 |
| Turchia | 2.420.000 | 19 |
| USA | 66.500.000 | 84 |

Figura 2.4: Percentuali riutilizzo bitume, 2010. ^[15]

Con il passare degli anni la media europea di riutilizzo del fresato d'asfalto si è assestata a circa il 65%, con l'Italia che ha avuto un incremento ridotto, passando dal 20% del 2010 fino a circa il 30% del 2020. Gli altri Stati europei hanno avuto un aumento sostanziale, con la Francia che dal 40% del 2010 è passata al 75% nel 2020; la Svizzera ha alzato la percentuale dal 52% al 90%, la Germania ha mantenuto l'82%.

SITEB ha calcolato che il riutilizzo del 30% di conglomerato bituminoso riciclato, sul totale di 35 milioni di tonnellate utilizzato nel 2020, ha permesso il mancato impiego di 420.000 tonnellate di bitume vergine e il risparmio di 10,5 milioni di

tonnellate di inerti, con questi valori si ottiene un risparmio di circa 420 milioni di euro riguardanti solo le materie prime.

Inoltre, l'associazione ha stimato il risparmio se la percentuale del conglomerato bituminoso riciclato fosse del 50%. I valori ottenuti evidenziano un risparmio pari a 700 milioni di euro, circa 700 mila tonnellate di bitume in meno e 17,5 milioni di tonnellate di inerti vergini non utilizzati. ^[16]

Il riciclo del conglomerato bituminoso avviene mediante due differenti metodi: riciclo a caldo (*hot recycling*) e riciclo a freddo (*cold recycling*). Quest'ultima tecnica viene eseguita in situ e il materiale asportato non lascia il cantiere ma viene trattato sul posto. Questa metodologia permette un elevato risparmio sia dal punto di vista economico sia ambientale dato che si ha un numero ridotto di viaggi dei camion e dei tempi di lavoro a discapito di minore performance della miscela realizzata.

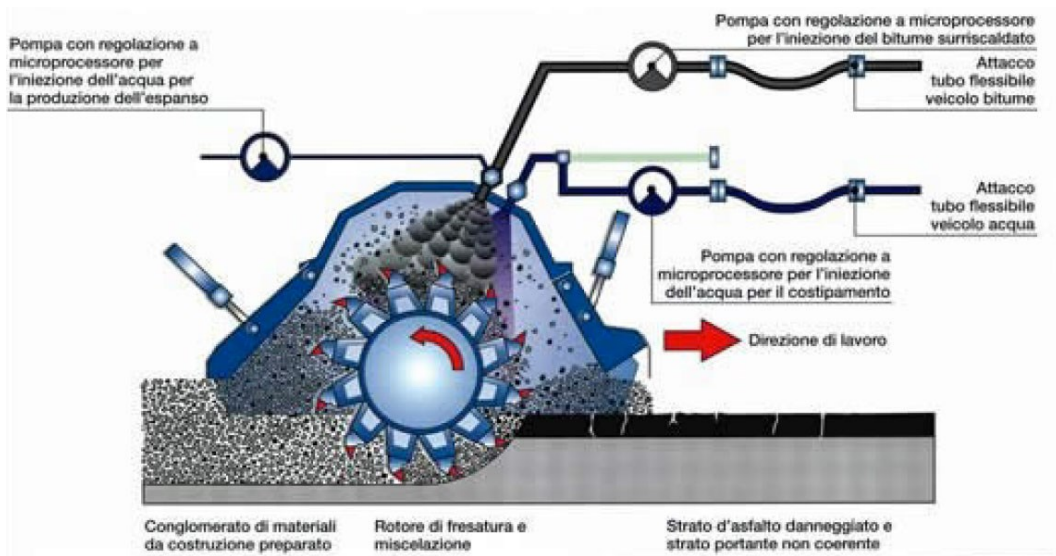


Figura 2.5: Processo di riciclo a freddo in situ.

In figura 2.5 è possibile osservare le varie fasi del processo di riciclo a freddo in situ. I macchinari utilizzati per il riciclo a freddo sono i seguenti:

- Pulvimixer;
- Spandi cemento;
- Autocisterna contenente l'emulsione bituminosa;

- Autocisterna per il rifornimento di acqua;
- Rulli per la compattazione.

Le macchine fresatrici, come descritto in precedenza, sono dotate di un tamburo di fresatura composto da un elevato numero di utensili da taglio che asportano l'asfalto preesistente. Mentre si svolge questa operazione, l'acqua contenuta in una cisterna collegata viene erogata mediante un tubo e spruzzata all'interno della camera di miscelatura della stessa. L'acqua emessa viene misurata con precisione mediante microprocessori per ottenere un contenuto d'umidità ottimale durante il costipamento. Infine, mediante un ulteriore tubo viene erogata direttamente nella camera di miscelatura l'emulsione bituminosa che può essere composta da bitume schiumato o altre tipologie di miscele come il bitume sovrastabilizzato.^{[17][18]}

La *figura 2.6* rappresenta il treno di veicoli utilizzati in tutto il processo a freddo, la lunghezza totale dei mezzi può portare a non utilizzare questa metodologia in qualsiasi occasione. Inoltre, il riciclo a freddo molto spesso necessita di una maggiore manutenzione a causa del fatto che i risultati ottenuti hanno valori più bassi di quelli desiderati (per tale motivo, il riciclaggio a freddo è spesso adibito alla costruzione di strati profondi della pavimentazione).

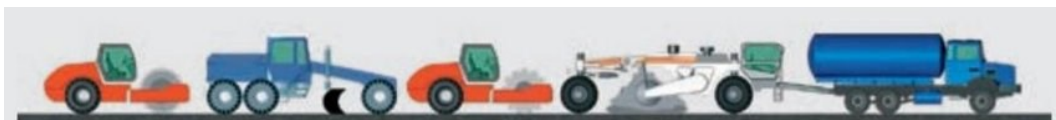


Figura 2.6: Treno mezzi utilizzati nel riciclo a freddo.

Il riciclo della pavimentazione a caldo avviene mediante l'utilizzo di impianti che possono essere fissi o mobili. L'utilizzo della metodologia a caldo è ampiamente diffuso, sia grazie all'elevato numero di impianti nel territorio, sia perché permette maggiori prestazioni del conglomerato bituminoso realizzato.

Gli impianti fissi si dividono in due categorie principali: impianti discontinui e continui.

2.1.1 Impianti discontinui

Gli impianti discontinui sono caratterizzati, come si vede in *figura 2.7*, dalla presenza a valle dello stabilimento di una torre di miscelazione dove il conglomerato bituminoso viene prodotto in modo ciclico e non continuativo.

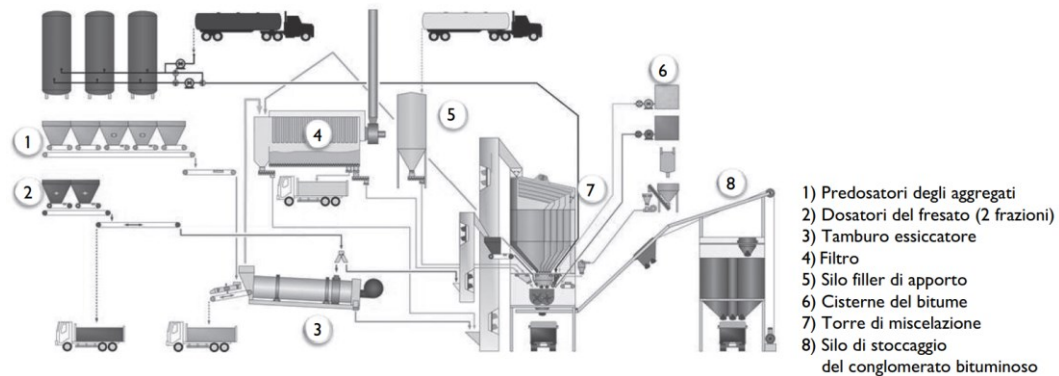


Figura 2.7: Esempio di impianto discontinuo.

Il processo produttivo del conglomerato è diviso in due fasi:

- 1° Fase, dalle tramogge di alimentazione vengono estratti gli aggregati e immessi in proporzioni coerenti con la distribuzione granulometrica della miscela obiettivo all'interno del tamburo essiccatore. All'interno di quest'ultimo viene realizzata un'essiccazione mediante flussi opposti di calore. I gas di scarico prodotti dall'intero processo sono convogliati verso un sistema di filtri con lo scopo di trattenere le polveri che poi saranno utilizzate come filler durante la miscelazione.
- 2° Fase, gli aggregati essiccati sono trasportati mediante un elevatore a tazze nella parte superiore della torre di miscelazione. In quest'area sono presenti dei vagli vibranti, contenitori di stoccaggio, sistema di pesatura e il mescolatore.^[19]

I vagli eseguono una riclassificazione della dimensione degli aggregati, per questo è necessario che il quantitativo di materiale sia corretto per non intasare un determinato vaglio e creare l'effetto di "galleggiamento" con il materiale lapideo di minor dimensione che tende a posizionarsi sopra rispetto a quelli di maggior dimensione con il rischio di ricadere nel contenitore corrispondente alla classe

superiore. Gli aggregati, opportunamente divisi, vengono poi combinati mediante sistema di pesatura e inseriti nel miscelatore in quantità adeguate per ottenere la miscela di progetto.

La peculiarità di questi impianti è la realizzazione di una doppia operazione di proporzionamento degli aggregati. La prima per inserire il materiale nell'essiccatore e la seconda nella torre di miscelazione con i vagli e la pesatura. Inoltre, è da tenere presente che la pesatura avviene sugli aggregati asciutti eliminando il problema del tenore d'acqua per la miscelazione ed il dosaggio del bitume. [19]

L'impianto discontinuo può essere modificato per inserire all'interno della miscela di progetto il fresato riciclato. Le modifiche possono essere molteplici e variano da una all'altra la quantità di RAP che può essere inserita all'interno del conglomerato. Gli aggregati del fresato sono ricoperti di bitume ed è quindi necessario evitare di essiccare il RAP all'interno dell'essiccatore dato che il bitume si potrebbe cristallizzare, impedendo la corretta realizzazione della miscela di progetto e immettendo nell'aria sostanze cancerogene.

Le varie tipologie di impianto discontinuo per il riciclo del RAP sono state esposte al CEDR (*Conference of European Directors of Road*) nel 2012 e sono le seguenti:

- *Drum mixer Plant (RAP)*, in un impianto tradizione al tamburo viene aggiunto un foro per immettere il fresato riciclato. Come accennato precedentemente e osservabile in *figura 2.8*, il RAP non deve essere a contatto con la fiamma quindi sarà immesso dietro alla fiamma se si ha un tamburo a controflusso, oppure, se il tamburo è a flusso parallelo al fresato, sarà aggiunto dell'inerte. I principali impianti aventi tamburo convenzionale possono utilizzare anche il 50% di RAP, ma bisogna porre attenzione al possibile "fumo blu", cioè la volatilizzazione del legante che ricopre gli aggregati.

I metodi più efficaci per limitare il problema del fumo blu (*blue smoke*) sono ridurre la percentuale di RAP all'interno del tamburo e aumentare il contenuto

d'acqua del fresato. Dato che entrambe le opzioni comporterebbero un aumento dei tempi/costi e una riduzione del materiale riciclato, si predilige l'utilizzo di un tamburo avente una configurazione alternativa.

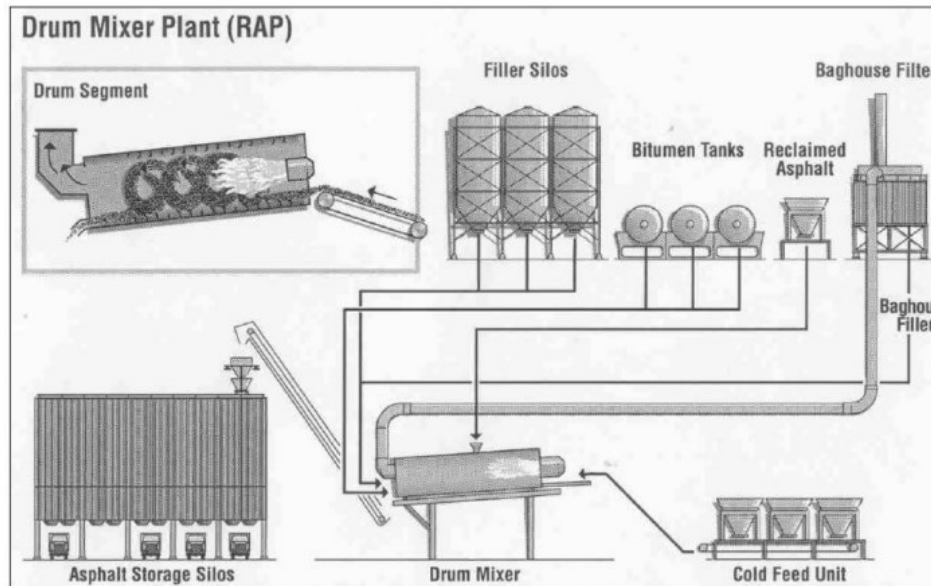


Figura 2.8: Impianto discontinuo per riciclo RAP.

- *Double Barrel Drum Mixer*, è una configurazione che consiste nell'inserire il fresato a valle della fiamma dell'essiccatore in modo da ridurre la formazione di gas cancerogeni (figura 2.9). Il RAP si riscalda mediante un processo di conduzioni dovuto agli aggregati vergini che lo circondano. Molto spesso, all'interno del tamburo, sono posizionate paratie in acciaio che forzano il materiale riciclato a miscelarsi con gli aggregati vergini in modo da ridurre il problema del "fumo blu". Rispetto alla configurazione precedente in questa si ha maggiore spazio di miscelazione e si ha un'apposita sezione anellare all'interno del tamburo dedicata alla miscelazione tra fresato e aggregati vergini. Inoltre, i fumi prodotti dagli aggregati vengono canalizzati verso la fiamma in modo da essere bruciati producendo un minore inquinamento che si traduce in minori emissioni. Essendo l'essiccatore con flusso controcorrente ha ritmi di produzione più elevati con consumi ridotti.

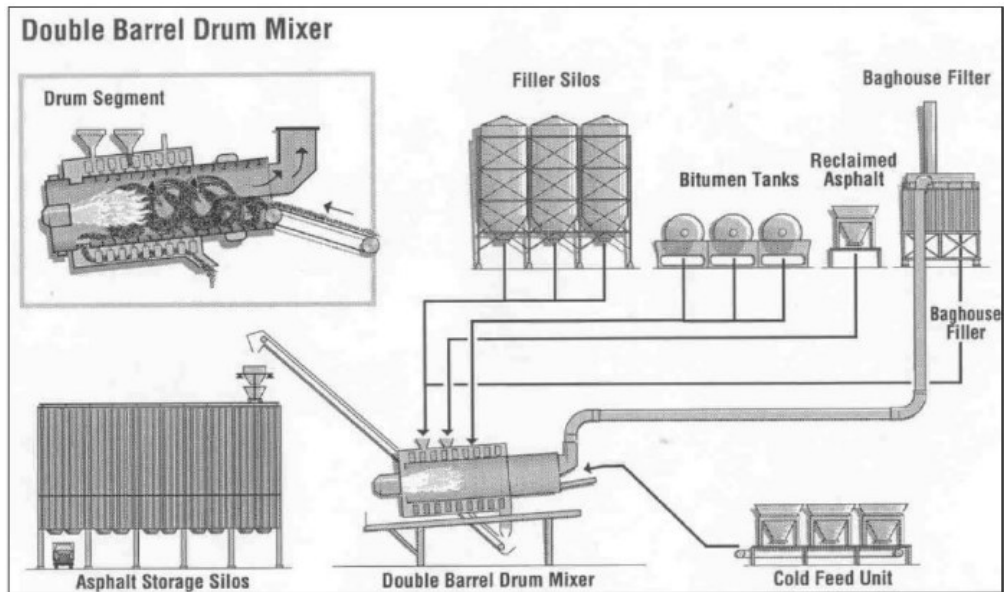


Figura 2.9: Impianto discontinuo per riciclo RAP con tamburo a doppia canna.

- *Batch Mixing Plant*, in questa tipologia di impianto è presente, posta in serie all'essiccatore, una unità di miscelazione dove vengono miscelati gli aggregati con la quantità corretta di bitume per ottenere la miscela di progetto opportuna. Si possono avere vari metodi per aggiungere il RAP all'interno della miscela:

- Prima dell'elevatore a caldo senza vagliatura o con vagliatura;
- Nella tramoggia dei pesatura;
- Utilizzando un essiccatore separato per il riscladamento del fresato prima della miscelazione con gli aggregati vergini.

Gli impianti *batch* non permettono un elevato utilizzo di RAP, si hanno percentuali di riciclo medie pari a 10-20% e raramente si supera il 40%. Questi valori sono dovuti alle problematiche descritte in precedenza come la nascita del "fumo blu", ma anche a possibili intasamenti dell'elevatore a caldo.

- *Batch Mixing Plant (Cold RAP Method)*, la peculiarità di questo metodo a freddo consiste nell'aggiunta del materiale riciclato non all'interno dell'essiccatore (*rotary drum dryer*), come si osserva in *figura 2.10*, ma in ingresso all'unità di miscelazione (*mixer unit*). Anche in questo caso come nelle configurazioni precedenti, anche se lieve, si ha una asciugatura per conduzione di calore da parte degli aggregati vergini in uscita dall'essiccatore. I metodi a freddo permettono una percentuale di riciclo che varia tra il 10% e il 30%.

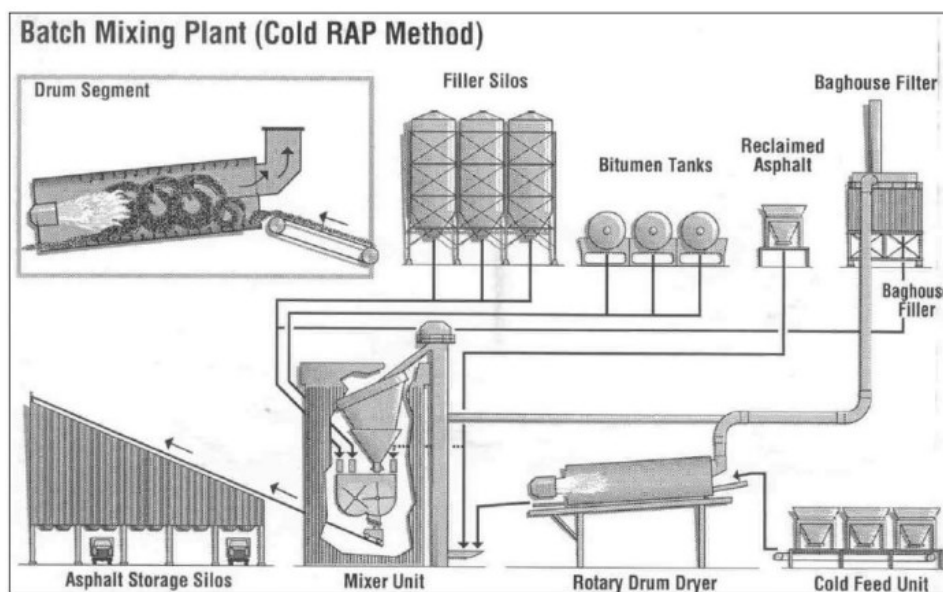


Figura 2.10: Impianto con riciclaggio a freddo del fresato d'asfalto.

- *Batch Mixing Plant (Warm RAP Method)*, il seguente metodo viene anche definito "a caldo" perché sono presenti due essiccatori (*figura 2.11*). Il primo essiccatore preriscalda il materiale di recupero senza andare a bruciare il bitume presente, il secondo ha la funzione di asciugare gli aggregati vergini. In seguito, entrambi i materiali essiccati vengono posti all'interno della *Mixer Unit* per la miscelazione e l'aggiunta del corretto quantitativo di bitume. La percentuale di riciclo in questa configurazione va dal 30% al 70%, valore raramente raggiungibile.

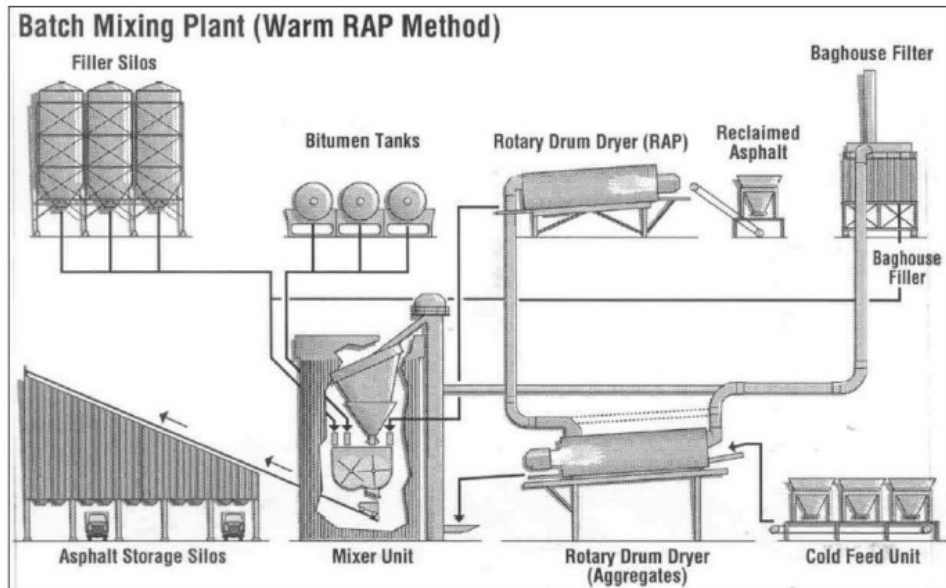


Figura 2.11: Impianto di riciclo a caldo del fresato di asfalto.

- *Batch Mixing Plant (Recycling via a recycling ring)*, una variante del metodo di riciclaggio a caldo è il sistema ad anelli di riciclaggio (figura 2.12). In questa configurazione gli aggregati vergini ed il materiale riciclato vengono introdotti nello stesso essiccatore ma in due sezioni differenti. Il RAP viene riscaldato dietro la fiamma garantendo un non surriscaldamento del materiale e gli aggregati vergini sono posti davanti alla fiamma. La percentuale di riciclaggio varia dal 30% al 50%. [20]

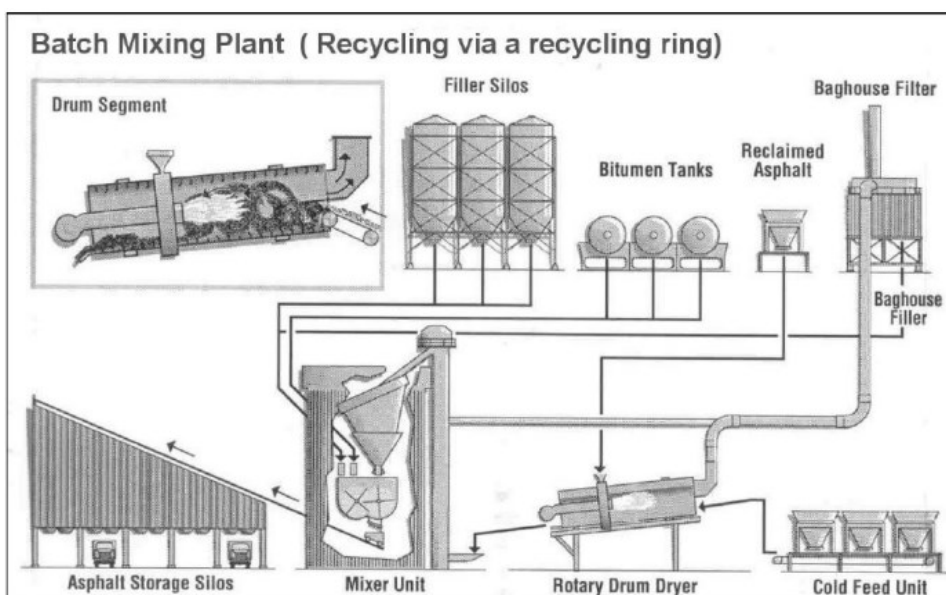


Figura 2.12: Impianto di riciclo a caldo con metodo ad anelli.

2.1.2 Impianti continui

Gli impianti continui sono meno costosi e necessitano di una ridotta manutenzione, ma in Italia risultano scarsamente adoperati perché devono essere utilizzati per produrre miscele senza variazioni e ottenere produzioni continuative.

Dei seguenti impianti si possono distinguere due tipologie principali:

- *Impianto continuo tipo drum mixer*, è caratterizzato da un processo produttivo che si svolge in un unico macchinario che esegue sia essiccazione che miscelazione. Lo schema, presente in *figura 2.13*, rappresenta le varie fasi del processo di produzione del conglomerato bituminoso. Gli aggregati vergini estratti dalle cave vengono trasportati fino all'impianto e suddivisi in base alla loro natura e classe granulometrica. A differenza degli impianti discontinui non è presente una successiva vagliatura degli aggregati quindi i materiali una volta stoccati devono essere ben separati per non far avvenire contaminazioni. Per ottenere la corretta miscela di progetto sono presenti nell'impianto 5 o 6 tramogge con inferiormente dei nastri estrattori con celle di carico che variando la velocità dosano la quantità dei materiali. In seguito, gli aggregati vengono posizionati sul nastro collettore avente un sistema di pesatura del materiale umido che permette di determinare il tenore di umidità per quantificare il bitume da utilizzare. Il materiale viene inserito nell'essiccatore-miscelatore con tamburo concorde, poi l'aggregato entra in vicinanza della fiamma e si allontana progressivamente con l'eliminazione dell'acqua presenti nei pori. Grazie a questa configurazione il legante viene immesso ad una distanza di sicurezza dalla fiamma evitandone la combustione o l'eccessiva ossidazione.

- *Impianto continuo con mescolatore interno*, rispetto al precedente presenta un essiccatore con tamburo a flussi controcorrente. Gli aggregati entrano nel macchinario e si avvicinano alla fiamma prima di uscire ed essere trasportati all'interno del miscelatore. Mantenendo separati miscelatore ed essiccatore si ottiene un rendimento termico elevato dato che il legante è immesso a distanza dalla fiamma.

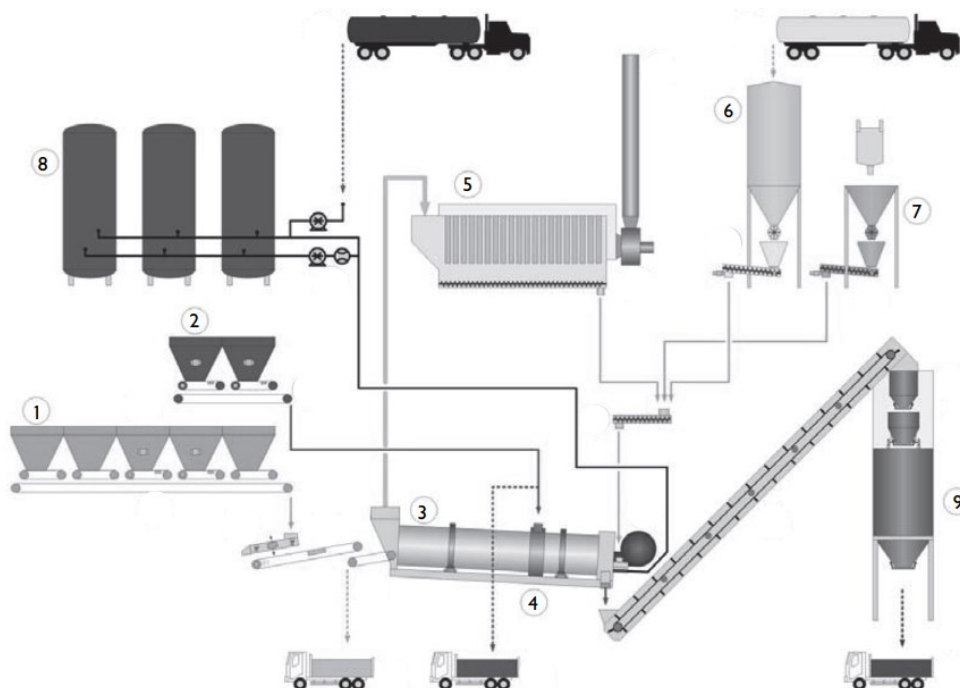


Figura 2.13: Impianto continuo con drum mixer.

Gli impianti continui possono essere modificati per utilizzare all'interno della miscela obiettivo una determinata quantità di RAP ed è possibile arrivare a percentuali del 70%. Si hanno varie modifiche che possono essere attuate:

- *Dual – feed*, è un sistema a doppia alimentazione in cui si hanno due zone differenti all'interno dell'essiccatore per immettere gli aggregati (figura 2.14). Il primo ingresso avviene in vicinanza della fiamma ed è esclusivo degli aggregati vergini, nel secondo viene inserito il fresato riciclato ed è posto a circa metà cilindro in modo che la fiamma non danneggi il materiale. Il riscaldamento del RAP avviene per contatto nella seconda parte del cilindro in cui si ha la fase di miscelazione.

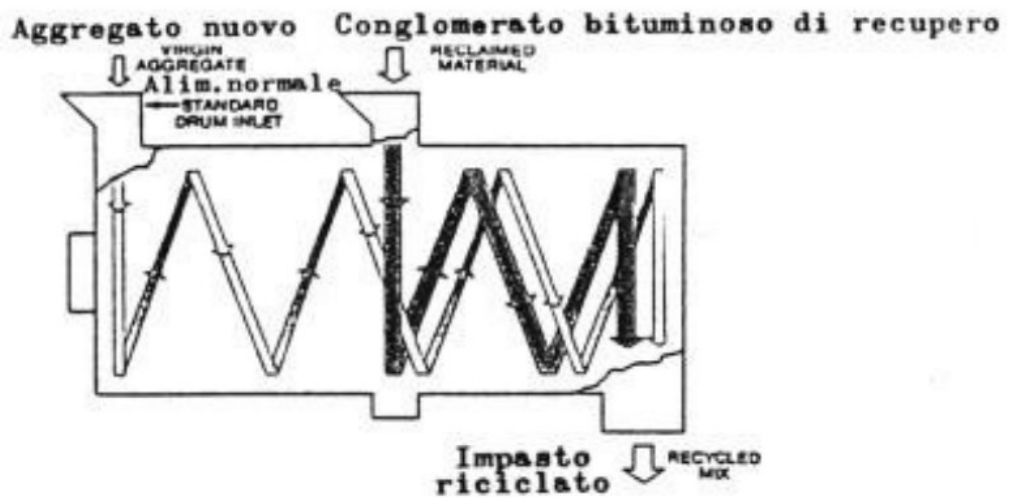


Figura 2.14: Drum mixer in configurazione dual – feed.

- *Drum – in – drum*, il sistema del cilindro nel cilindro consiste, come si nota in figura 2.15, nell'aver un doppio tamburo. Nel primo, il più piccolo e ravvicinato alla fiamma, vengono inseriti gli inerti vergini che subiscono il riscaldamento diretto della fiamma. Nel secondo, il più grande, vengono inseriti gli aggregati di recupero che non subiscono un riscaldamento diretto. Infine, dato che il cilindro interno è più corto, ad una certa distanza di sicurezza dalla fonte di calore, si ha la miscelazione dei due materiali.

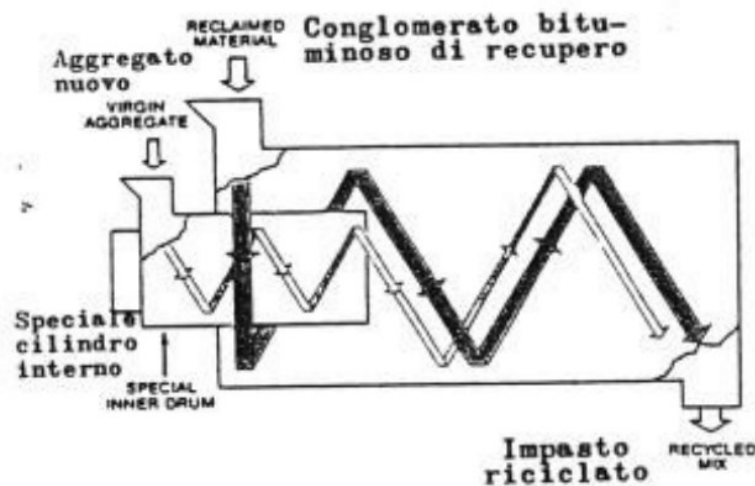


Figura 2.15: Drum mixer in configurazione drum – in – drum.

-*Pyrocone*, è una configurazione che ha la funzione di controllare la temperatura e quindi l'essiccamento degli inerti. Nella *figura 2.16* si può osservare che all'interno del cilindro si ha un cono taglia fiamma costituito da materiale refrattario con speciali fori.

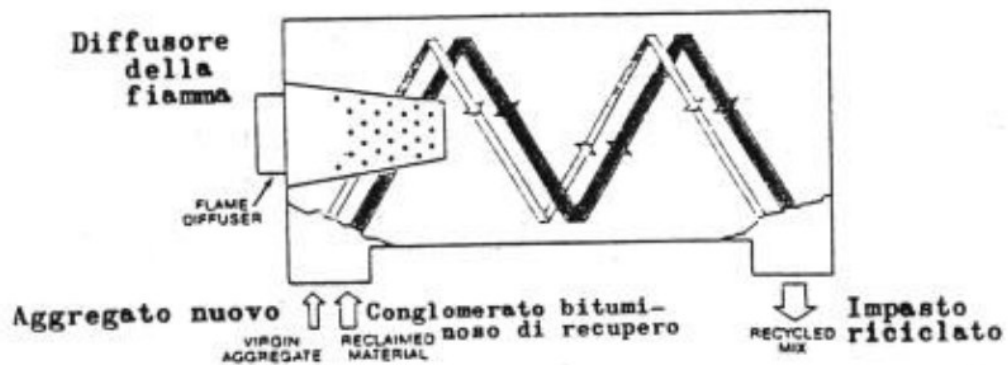


Figura 2.16: Drum mixer in configurazione pyrocone.

- *Shield*, si ha la presenza di uno schermo metallico posto di fronte alla fiamma in modo da non avere un contatto diretto con essa. Il fresato viene immesso nel lato opposto alla fiamma, al contrario degli aggregati vergini che ne vengono posti a contatto.^[21]

Nell'ultimo decennio sono stati sviluppati impianti che permettessero di realizzare miscele contenenti il 100% di RAP al suo interno. Il conglomerato bituminoso realizzato contiene solamente il fresato e gli additivi ringiovanenti, si parla quindi di riciclo multiplo a caldo (*multiple hot recycling*). Questi impianti sono descritti brevemente in seguito.

- *RAPpro*, l'impianto realizzato dalla Phoenix Industries, *figura 2.17*, permette una realizzazione tradizionale delle miscele. La configurazione modificata consente d'avere all'interno del tamburo una diminuzione dell'ossigeno presente in modo da ridurre ulteriormente l'invecchiamento del fresato. Inoltre, permette la rimozione delle zone di stoccaggio degli aggregati e dei serbatoi per il legante vergine con una riduzione dello spazio e delle emissioni. Il metodo di produzione della miscela si basa principalmente sulla

volumetria e sul PelletRAP, un ringiovanente gommoso proveniente dagli pneumatici di scarto. [22]



Figura 2.16: Impianto RAPpro.

- *AMMANN RAH 100*, in *figura 2.17* è rappresentato lo schema dell'impianto RA100 realizzato dall'azienda AMMANN. La configurazione si basa su un riscaldamento delicato del RAP mediante l'utilizzo di un essiccatore controcorrente. Il fresato viene posto ad una distanza tale che si abbia un'elevata temperatura dell'inerte ma, allo stesso tempo, non vi siano problematiche relative al "fumo blu" o all'ossidazione del bitume. [23]

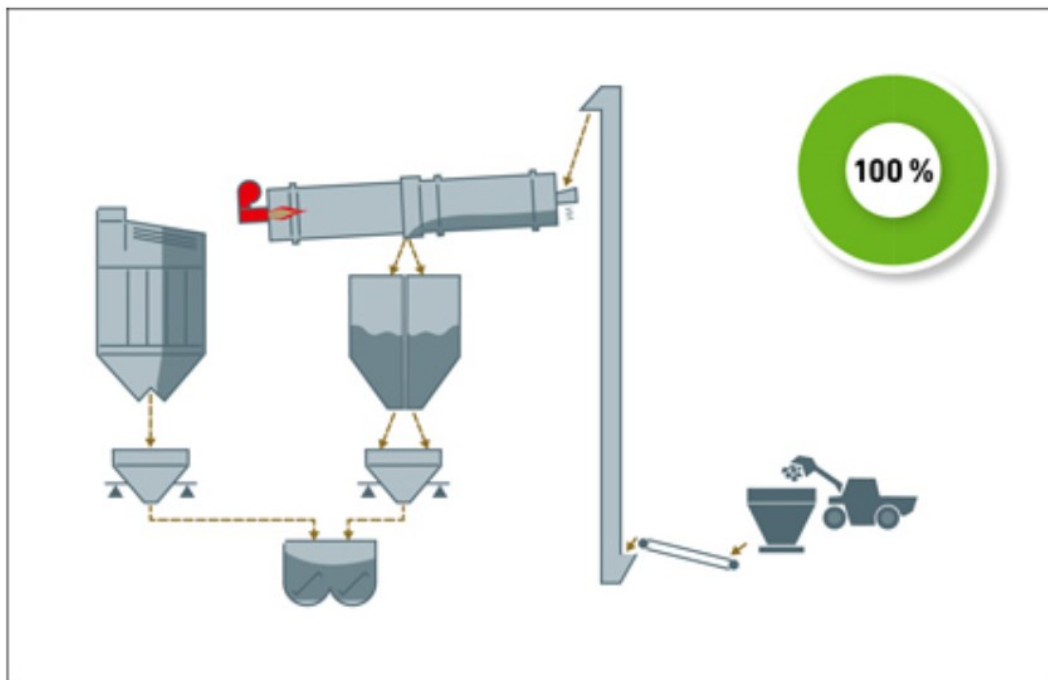


Figura 2.17: Schema impianto AMMANN RAH 100.

- *Benninghoven Plant (Wirtgen Group)*, l'impianto si basa sull'utilizzo di un essiccatore ad azione controcorrente che permette di realizzare una miscela con il 100% di fresato. I gas prodotti sono direzionati verso la fiamma e in questo modo si ha un abbassamento delle emissioni con un minore sforzo dell'unità filtrante.^[24]



Figura 2.18: Schema impianto Benninghoven.

2.2 Caratteristiche fisico-chimiche del Bitume

Il RAP, come descritto nel paragrafo precedente, è un materiale ottenuto dal riciclo mediante fresatura degli strati della pavimentazione stradale composti dal conglomerato bituminoso. Nella vita utile la pavimentazione stradale subisce un processo di invecchiamento che colpisce prevalentemente la componente di legante presente nel fresato modificandone le caratteristiche fisico-chimiche.

Per presentare i processi che avvengono all'interno del RAP a causa dell'invecchiamento è necessaria una descrizione delle sue funzioni e caratteristiche del bitume.

Il bitume è definito dal dizionario Treccani come una miscela di idrocarburi naturali o ottenuti per pirolisi dai grezzi di petrolio, di colore da bruno a nero e di durezza e volatilità variabili, solubili in solfuro di carbonio; quelli naturali si rinvenivano in giacimenti allo stato di notevole purezza o, più spesso, miscelati con sostanze minerali a formare gli asfalti naturali. Il bitume si usa come tale, o sotto forma di soluzioni in solventi organici, o fluidificato con oli minerali, e trova impiego principalmente nelle pavimentazioni stradali, nelle impermeabilizzazioni, nella preparazione di cartoni e vernici impermeabili. [25]

Il bitume è un materiale viscoelastico termo dipendente con una consistenza semisolida e con la temperatura di fusione non ben definita variando in base alla provenienza del legante stesso.

La viscoelasticità del materiale permette una variazione della risposta alle diverse applicazioni del carico. Se il carico è applicato per un tempo breve il legante ha una risposta elastica con una deformazione che, una volta finita la sollecitazione, viene recuperata. Invece, se il carico è applicato per un tempo elevato il legante ha una risposta viscosa con possibile origine di deformazioni irreversibili.

La termo dipendenza conferisce al materiale una variazione del suo stato alle diverse temperature. Il bitume alle basse temperature si presenta allo stato solido, semisolido alla temperatura ambiente e liquido alle alte temperature.

La viscosità e la termo dipendenza dipendono fortemente dalla composizione chimica del materiale. Quest'ultima varia in base all'origine del bitume e se viene eseguita una analisi chimica si osserva la composizione seguente:

- carbonio (80%);
- idrogeno (10%);
- zolfo (1-10%);
- ossigeno (0-3%);
- azoto (0-1%);
- metalli sottoforma di sali.

Il bitume essendo un derivato del petrolio è costituito da asfalteni, ovvero idrocarburi che determinano le caratteristiche reologiche del materiale. Difatti, gli asfalteni sono i responsabili dell'indurimento del bitume al variare della temperatura, determinano la viscoelasticità del legante e sono una delle principali cause dell'invecchiamento.

Si ha anche la presenza di resine e oli maltenici, le prime con la funzione di rendere il bitume flessibile, elastico, duttile e adesivo. Gli oli essendo il componente più fluido permettono una elevata lavorabilità alle alte temperature, quindi nella fase di produzione, trasporto e posa in opera.

2.2.1 Tipologie ed effetti dell'invecchiamento del bitume

Gli elementi, descritti nel paragrafo precedente, che compongono il bitume danno vita a delle reazioni chimiche che comportano il deterioramento del legante.

All'interno del RAP lo zolfo, idrogeno e azoto a contatto con l'ossigeno hanno dato vita ad un processo di ossidazione che è una delle principali forme di invecchiamento del bitume.

Oltre all'ossidazione, il bitume che si può ottenere dal fresato è stato soggetto al processo di volatizzazione che avviene principalmente alle alte temperature nelle fasi di produzione, lavorazione e posa in opera e porta ad una variazione della

composizione chimica. Un ulteriore effetto di invecchiamento è causato dall'irraggiamento solare con i raggi UV che colpiscono il materiale durante la sua vita utile modificando le sue caratteristiche.

Con il termine *aging* si identifica il processo di invecchiamento che subisce il bitume, tale fenomeno modifica le caratteristiche fisiche e chimiche del legante rendendolo maggiormente fragile e rigido con la formazione di fessurazioni che non rendono più adatto il materiale per una pavimentazione in esercizio.

I tipi di invecchiamento dei bitumi si dividono in due tipologie principali, la prima che determina fragilità e rigidità del legante è definita "invecchiamento fisico". Questa tipologia è reversibile e dipende dal cambiamento della struttura molecolare dopo i processi di riscaldamento/congelamento e dall'azione dell'acqua.

La seconda definita "invecchiamento chimico" è irreversibile e provoca l'alterazione della componente molecolare del bitume. Il processo chimico è causato, come descritto in precedenza, dai processi di ossidazione, dalle radiazioni solari e dai cambiamenti di temperatura.^[26]

A causa dell'invecchiamento chimico il bitume subisce una modifica nel quantitativo di frazioni che lo compongono. Gli effetti principali dell'*aging* sono una diminuzione del contenuto di aromatici che porta ad un aumento delle resine e degli asfalteni presenti all'interno del legante. Queste variazioni di quantità sono dovute all'innescarsi di una reazione a catena all'interno del bitume con gli aromatici che generano resine e queste generano asfalteni.^[26]

L'invecchiamento fisico o reologico comporta una variazione delle caratteristiche principali del bitume misurate mediante determinati indicatori come la viscosità, l'indice di penetrazione, il punto di rammollimento, ecc. Anche quest'effetto di invecchiamento è legato a effetti chimici che si instaurano all'interno del materiale con una variazione delle varie componenti a causa degli effetti di ossidazione, volatilizzazione e irradiazione.

L'invecchiamento si può descrivere come un processo progressivo nel tempo in cui si possono distinguere due fasi:

- Invecchiamento a breve termine (*Short Term Aging, STA*), si verifica principalmente alle alte temperature del conglomerato quindi nella fase di produzione, stesa e costipazione. Tale invecchiamento può essere simulato in laboratorio mediante la prova RTFOT, (*Rolling Thin Film Oven Test, EN 12067 - ASTM D2872*), rappresentata in *figura 2.19*.

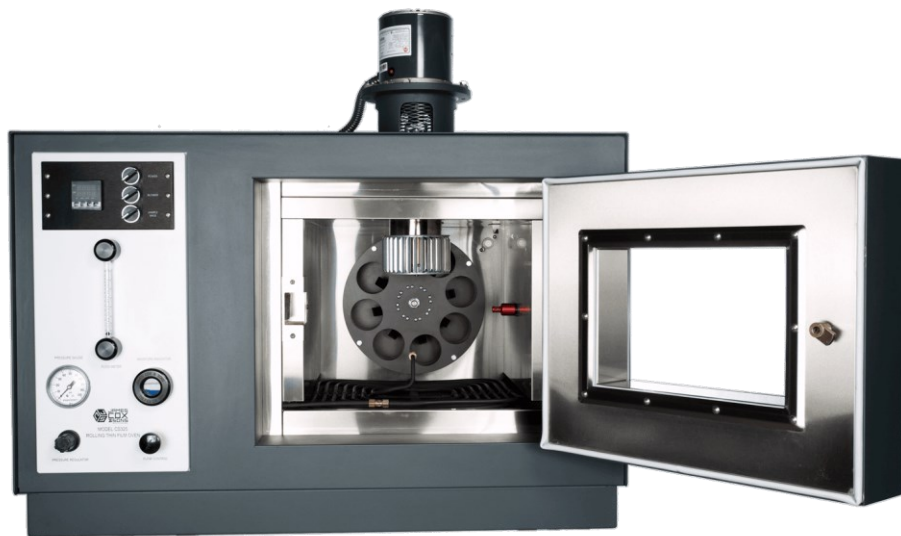


Figura 2.19: Strumentazione prova RTFOT.

- Invecchiamento a lungo termine (*Long Term Aging, LTA*), si verifica durante l'esercizio della pavimentazione stradale ed è dovuto all'esposizione di quest'ultima alle radiazioni solari, alle condizioni climatiche, all'effetto degradante dell'acqua, alla presenza di un'elevata quantità di vuoti e alla posizione dello strato studiato. Anche tale invecchiamento può essere simulato in laboratorio mediante la prova PAV (*Pressure Ageing Vessel, EN 14769 – ASTM D6521*), rappresentata in *figura 2.20*.^[27]



Figura 2.20: Strumentazione prova PAV.

2.3 Additivi ringiovanenti

Nel riciclo delle pavimentazioni stradali, come analizzato nel Capitolo 1, è necessario l'utilizzo di additivi ringiovanenti con lo scopo di rigenerare l'asfalto invecchiato ottenuto dal RAP e ripristinare le proprietà originali perse durante il processo di ossidazione.

Il ringiovanente viene utilizzato per regolare e migliorare sia le proprietà chimiche che fisiche del legante come aumentare la flessibilità del bitume, incrementare l'adesione legante-aggregati e ridurre la viscosità della miscela.

Le principali funzioni dell'additivo ringiovanente sono:

- Effetto di riduzione della viscosità

Il ringiovanente, se aggiunto al bitume, può comportare una riduzione della viscosità. Questa variazione è data dall'interazione tra l'additivo e la frazione maltenica presente nel legante invecchiato. La viscosità finale della miscela è ottenuta dalla combinazione tra ringiovanente, legante invecchiato e legante vergine e produce un effetto di lubrificazione che permette una maggiore lavorabilità della miscela.

- Effetto di compensazione della composizione chimica

I ringiovanenti di origine petrolchimica sono ricchi di aromatici che permettono il parziale ripristino della composizione chimica persa durante il processo di invecchiamento. È possibile calcolare l'effetto dell'additivo mediante il rapporto tra malteni e asfalteni presenti sulla miscela una volta realizzata la miscela.

- Effetto disperdente

Determinati ringiovanenti agiscono come disperdenti o compatibilizzanti dato che sono in grado di rompere o disgregare i legami tra le numerose molecole di asfalteni create dopo il processo di ossidazione. L'additivo permette una riorganizzazione a livello molecolare del legante invecchiato ottenendo caratteristiche reologiche migliori.

In letteratura vengono identificati diversi tipi di ringiovanenti che possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- Estratti aromatici e oli naftenici, distillati dal petrolio grezzo

I seguenti ringiovanenti sono caratterizzati da una bassa viscosità e comprendono una frazione aromatica che permette, aumentando i malteni, di ripristinare l'equilibrio delle frazioni che compongono il bitume ad uno stato precedente l'invecchiamento. Questa categoria di additivi è molto utilizzata e dagli studi eseguiti su di essa sono emersi problemi relativi alle emissioni di composti volatili che possono causare problemi alla salute soprattutto in fase di realizzazione della miscela.

- Oli di origine biologica, derivanti dalla produzione di piante (agro-industriali o forestali)

Questo gruppo comprende un'ampia gamma di prodotti come l'olio di semi di girasole, di soia, di palma, di ricino, di anacardi, di semi di cotone, di lino, ecc. A differenza degli oli da cucina questi elencati non hanno ancora avuto una prima fase di utilizzo ma vengono adoperati come additivi appena il

prodotto viene realizzato. I ringiovanenti biologici hanno la principale funzione di ammorbidire il legante invecchiato grazie alla loro inferiore viscosità. Inoltre, alcuni particolari prodotti di questo gruppo possono fungere da disperdenti.

- Oli di origine biologica per usi ingegneristici

Sono oli realizzati mediante la trasformazione di materie prime derivanti dai boschi di conifere come il CTO (*Crude Tall Oil*). Il CTO è un prodotto resinoso ottenuto trattando gli alcali provenienti dai prodotti di decomposizione del legno con acidi. Il Tall Oil agisce sia come ammorbidente grazie alla minore viscosità rispetto al bitume, sia come disperdente/compatibilizzante delle molecole di asfaltini.

- Oli industriali (olio motore)

L'olio esausto viene raccolto in appositi centri e distillato mediante un processo definito "pesante" che elimina le frazioni contaminate al suo interno e permette di ottenere un ringiovanente per il bitume. Il seguente additivo ha come principale funzione quella di ammorbidire il bitume invecchiato grazie ad una viscosità inferiore. In questo caso non è presente un riequilibrio delle frazioni componenti il legante, ma solo una variazione di viscosità. Il processo di distillazione deve essere eseguito correttamente a causa della presenza all'interno dell'olio motore di metalli pesanti come zinco, cromo e rame che possono essere cancerogeni.

- Oli e grassi da cucina riciclati e trattati

Un esempio di oli utilizzati post-trattamento come additivi sono l'olio di girasole, di colza, d'arachidi o grassi come lo strutto. Come nel caso precedente la funzione principale è quella di diminuire la viscosità del legante.

- Additivi utilizzati in ambito ingegneristico

Si tratta di un vasto gruppo di additivi specificatamente realizzati per un uso ingegneristico. Le materie prime utilizzate sono provenienti da varie fonti sia dell'industria biologica vegetale che dell'industria petrolchimica.

Questi prodotti agiscono principalmente come ammorbidenti per abbassare la viscosità della miscela, ma permettono anche una riduzione della temperatura per le lavorazioni e un miglioramento delle proprietà del legante. Le applicazioni dei seguenti additivi sono ancora in fase di studio sia per quanto riguarda i benefici sia per l'impatto ambientale. ^[28]

CAPITOLO 3

Obiettivi dell'analisi

Il presente capitolo ha lo scopo di descrivere il lavoro eseguito negli ultimi anni dal gruppo internazionale di ricerca RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) e definire gli obiettivi dell'analisi svolta nella *Sezione Sperimentale Stradale del Laboratorio di Materiali da Costruzione del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Padova*.

3.1 Descrizione generale e obiettivi

Lo studio in esame prende spunto da quanto sviluppato dal RILEM, un comitato accademico che, tra gli altri, ha l'obiettivo di condurre ricerche riguardanti il riciclaggio dei materiali in conglomerato bituminoso.

Il “technical committee” denominato *RILEM TC 264 RAP* ha promosso una ricerca multi-laboratorio con lo scopo di sviluppare un protocollo per la valutazione delle prestazioni di leganti bituminosi composti da bitume invecchiato ottenuto dal RAP, bitume vergine di aggiunta e additivo ringiovanente. Ciò al fine di determinare l'ottimale quantitativo di ringiovanente che permetta di ottenere le migliori prestazioni della miscela di progetto. Relativamente al tema in questione, il lavoro del gruppo RILEM attivo dal 2015 ha avuto modo di investigare molteplici aspetti correlati al riutilizzo di RAP a livello di legante anche dopo invecchiamento a breve e lungo termine con il Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) e il Pressure Ageing Vessel (PAV) e con percentuali di riciclo fra il 60% e il 100%. Tali materiali sono stati caratterizzati mediante analisi reologiche con Dynamic Shear Rheometer (DSR) per la misurazione del modulo complesso e dell'angolo di fase, e con il Bending Beam Rheometer (BBR) per le proprietà di rilassamento.

Nella realizzazione del mix design, la percentuale di bitume invecchiato proveniente dal fresato viene determinata in funzione del contenuto di RAP che si vorrà utilizzare nella miscela di progetto. Ad esso, viene aggiunto anche il legante vergine (di integrazione) per ottenere il contenuto di bitume di progetto della miscela finale. Nel caso in esame, si è stabilito di realizzare una miscela contenente il 60% (in massa) di RAP (il restante 40% sarà costituito da aggregato vergine). L'additivo ringiovanente, ARA, viene aggiunto alla miscela con la funzione di ripristinare le proprietà originali del legante invecchiato (la quantità di ringiovanente può variare fortemente in base al tipo di prestazioni che si vogliono ottenere).

La ricerca oggetto del presente elaborato si divide in diverse fasi, e ha l'obbiettivo di testare un protocollo per il progetto di miscele riciclate a caldo, anche contenenti un elevato quantitativo di RAP, validando quanto sin qui appreso dal gruppo di ricerca. Più in particolare, le fasi previste sono le seguenti:

1. Definizione delle proporzioni preliminari per il riciclaggio a caldo del conglomerato bituminoso.

Da tale proporzione si determina il quantitativo di bitume riciclato da considerarsi nella fase legante (bitume invecchiato + bitume vergine).

2. Definizione delle proprietà del bitume.

In questa fase vengono eseguiti dei test sul bitume invecchiato per visualizzare le sue proprietà.

3. Caratterizzazione dei materiali iniziali di riferimento.

In questa fase vengono eseguite delle analisi chimiche e fisico-meccaniche e reologiche sul bitume.

4. Determinazione della composizione ottimale della miscela di leganti.

Sulla base dei test precedenti, le proprietà reologiche sono utilizzate per calcolare la quantità ottimale di ringiovanente (su composti a quantitativo di ringiovanente diverso).

5. Preparazione della miscela ottimale di legante.

In questa fase viene realizzata la miscela con il quantitativo ottimale di ringiovanente determinato alla fase precedente.

6. Invecchiamento dei leganti con ringiovanente ottimale.

Mediante invecchiamenti di laboratorio a breve e lungo termine, una parte del legante ottimizzato viene trattato per simulare le prestazioni *post-aging*.

7. Validazione delle proprietà dei leganti, per tutti gli stadi di invecchiamento.

I leganti ottimizzati, a tutti gli stadi di invecchiamento, vengono analizzati con protocollo reologico per definirne le proprietà. I leganti contenenti bitume invecchiato e ringiovanito sono comparati, in termini di prestazioni, con quelli vergini di riferimento. La comparazione consente di stabilire l'efficacia del ringiovanente a tutti gli stadi di invecchiamento. Nel caso in cui i leganti esibissero prestazioni non comparabili, si realizzerà una nuova miscela modificando la percentuale di additivo, cambiando la tipologia di legante vergine o riducendo il contenuto di bitume invecchiato ottenuto dal RAP.

8. Confezionamento dei conglomerati bituminosi riciclati sulla base di quanto determinato ai punti precedenti.

Una volta determinato e validato il quantitativo ottimale di ringiovanente, verranno realizzate 3 miscele riciclate: la prima contenente proprio il quantitativo ottimale, la seconda contenente il 30% in meno di additivo ringiovanente, e la terza il 30% in più di additivo ringiovanente. Ciò al fine di valutare l'influenza del contenuto di ringiovanente anche a scala di miscela. Una 4 miscela, realizzata senza RAP (con solo materiali vergini) viene confezionata come conglomerato bituminoso di riferimento.

9. Analisi delle prestazioni dei conglomerati bituminosi riciclati.

La presente attività costituisce il cuore della ricerca eseguita a scala miscela. I conglomerati bituminosi prodotti (3 miscele riciclate + 1 miscela tradizionale di riferimento) vengono analizzati in termini di caratteristiche e proprietà, con riferimento alle principali prestazioni (caratteristiche compositive, rigidità, resistenza alle fessurazioni, fatica, ormaiamento). Ciò viene eseguito in termini comparativi rispetto alla miscela di riferimento, al fine di validare la procedura di ottimizzazione

del quantitativo di ringiovanente (eseguita a scala di legante), stabilendo se essa sia effettivamente in grado di fornire miscele riciclate aventi prestazioni accettabili, almeno pari a quelle tradizionali. [29]

CAPITOLO 4

Attività sperimentale

Nel seguente capitolo sarà presentata l'attività sperimentale svolta nella *Sezione Sperimentale Stradale del Laboratorio di Materiali da Costruzione del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Padova*. Saranno descritti i materiali utilizzati e le prove svolte su di essi, in accordo con quanto prescritto dalle principali normative nazionali ed europee.

4.1 Materiali costituenti

4.1.1 Aggregati di origine naturale

Gli aggregati lapidei sono costituiti da elementi naturali che uniti fra loro o miscelati con un legante permettono di realizzare i diversi strati della pavimentazione stradale. Gli inerti possono derivare o dalla frantumazione di rocce e materiali più grossolani oppure sono di derivazione alluvionale e in base alle loro dimensioni si dividono in due categorie principali:

- Aggregato grosso ($d \geq 2$ mm);
- Aggregato fino ($d < 2$ mm);
- Filler ($d < 0,063$).

Per la realizzazione del conglomerato bituminoso gli aggregati devono rispettare delle caratteristiche fisico-meccaniche racchiuse, ad esempio, nei Capitolati del CIRS (Centro Interuniversitario per la Ricerca Stradale) (*tabella 4.1 e tabella 4.2*) che si dividono in base al tipo di infrastruttura da realizzare.

| AUTOSTRADE ED EXTRAURBANE PRINCIPALI | | | | | |
|--------------------------------------|------------|-----------------|-----------------------|--------|-------|
| Trattenuto al crivello UNI n. 5 | | | | | |
| Indicatori di qualità | | | Strato pavimentazione | | |
| Parametro | Normativa | Unità di misura | Base | Binder | Usura |
| Los Angeles (*) | CNR 34/73 | % | ≤ 25 | ≤ 25 | ≤ 20 |
| Micro Deval umida (*) | CNR 109/85 | % | ≤ 20 | ≤ 20 | ≤ 15 |
| Quantità di frantumato | - | % | ≥ 90 | ≥ 90 | 100 |
| Dimensione max | CNR 23/71 | mm | 40 | 30 | 20 |
| Sensibilità al gelo | CNR 80/80 | % | ≤ 30 | ≤ 30 | ≤ 30 |
| Spogliamento | CNR 138/92 | % | ≤ 5 | ≤ 5 | 0 |
| Passante allo 0.075 | CNR 75/80 | % | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 |
| Indice appiattimento | CNR 95/84 | % | | ≤ 25 | ≤ 20 |
| Porosità | CNR 65/78 | % | | ≤ 1,5 | ≤ 1,5 |
| CLA | CNR 140/92 | % | | | ≥ 42 |

(*) Uno dei due valori dei coeff. Los Angeles e Micro Deval Umida può risultare maggiore (fino a due punti) rispetto al limite indicato, purché la loro somma risulti inferiore o uguale alla somma dei valori limite indicati.

Tabella 4.1: Capitolati CIRS sugli aggregati lapidei grossi.

| AUTOSTRADE ED EXTRAURBANE PRINCIPALI | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------------|--------|-------|
| Passante al crivello UNI n. 5 | | | | | |
| Indicatori di qualità | | | Strato pavimentazione | | |
| Parametro | Normativa | Unità di misura | Base | Binder | Usura |
| Equivalente in sabbia | CNR 27/72 | % | ≥ 50 | ≥ 60 | ≥ 80 |
| Indice Plasticità | CNR-UNI 10014 | % | N.P. | | |
| Limite liquido | CNR-UNI 10014 | % | ≤ 25 | | |
| Passante allo 0.075 | CNR 75/80 | % | | ≤ 2 | ≤ 2 |
| Quantità di frantumato | CNR 109/85 | % | | ≥ 50 | ≥ 70 |

Tabella 4.2: Capitolati CIRS sugli aggregati lapidei fini.

Gli aggregati naturali utilizzati in questa ricerca sperimentale sono i seguenti:

- Calcare 0/4 mm;
- Calcare 4/8 mm;
- Calcare 8/14 mm.

Gli aggregati di origine calcarea sono largamente utilizzati nella costruzione delle pavimentazioni stradali perché caratterizzati da una buona qualità, elevata affinità con il legante bituminoso, poca presenza di silice, nonché ampiamente disponibili nel contesto territoriale della ricerca.

4.1.2 Il fresato

Il fresato utilizzato nella sperimentazione è stato prelevato in un impianto locale, da un cumulo con pezzatura dichiarata 0/12. Non è nota l'origine dello stesso, di conseguenza non è possibile determinare a priori se esso contenga bitume di tipo tradizionale, o bitume modificato con polimeri. Di conseguenza, la frazione impiegata nello studio sperimentale è definita come:

- Fresato 0/12 mm.

4.1.3 Bitume

I bitumi utilizzati nelle analisi sperimentali sono di due tipologie:

- Bitume invecchiato (RAP)
- Bitume Vergine (V), 70/100.

Il primo viene estratto, mediante l'utilizzo di solventi come descritto nella normativa EN 12697-1, a partire dal campione di fresato prelevato in impianto. Il processo di estrazione consiste nell'utilizzare un estrattore a caduta, *figura 4.1*, costituito da un contenitore in vetro pirex e da un cestello in rete inox n.200 ASTM in cui viene inserito il fresato. Al di sotto del cestello si posizionano circa 700 ml di solvente. Il tutto viene chiuso e posizionato al di sopra di una fonte di calore che ha la funzione di portare il solvente in ebollizione a contatto con il coperchio del contenitore in cui è presente una corrente d'acqua fredda, condensa e ricade sul fresato separando il bitume dall'aggregato.

Il liquido di colore nero visibile nell'immagine contiene solvente, bitume e filler. Finita la prova il campione viene posto in una centrifuga per separare il filler e, infine, il rimanente viene fatto decantare per eliminare il solvente presente e ottenere solo il bitume invecchiato.



Figura 4.1: Estrattore a caduta.

La seconda tipologia di legante è un bitume 70/100, prelevato in un impianto locale. ^[30]

4.1.4 Ringiovanente

Nel paragrafo §2.3 sono state ampiamente presentate le varie tipologie e caratteristiche degli additivi ringiovanenti in commercio. Il presente studio utilizza il ringiovanente osservabile in *figura 4.2*, che deriva dal trattamento di olii

vegetali ed è utilizzato specificatamente per miscele aventi bitume proveniente dal RAP. Questo additivo è caratterizzato da:

- Un elevato potere rigenerante attraverso la modifica delle caratteristiche fisiche-chimiche del bitume invecchiato;
- Un'azione di riduzione della rigidità del bitume proveniente dal RAP;
- L'assenza di oli aromatici che possono modificare le caratteristiche chimiche della miscela.



Figura 4.2: Additivo ringiovanente impiegato.

Dal punto di vista fisico si presenta a temperatura ambiente come un liquido oleoso di colore marrone-rossastro e la scheda tecnica del prodotto evidenzia come la miscelazione con il legante può avvenire sia ad alte temperature che a temperatura ambiente. La quantità corretta di additivo varia dal 0,20% al 0,60% rispetto al peso del bitume proveniente dal RAP.

4.1.5 Test preliminari sui materiali

Per tutte le tipologie di inerti è stato realizzato un processo di asciugatura sia mediante stesura, osservabile in *figura 4.3*, sia mediante l'utilizzo di forni per eliminare l'acqua presente ed eseguire successivamente la granulometria.



Figura 4.3: Stesura aggregati per asciugatura.

4.1.5.1 Analisi granulometrica

Per ogni tipologia di aggregato è stata eseguita, su due campioni precedentemente asciugati, la granulometria mediante l'utilizzo di setacci con dimensione massima delle maglie di 15 mm e la minima di 0,063 mm, come osservabile in *figura 4.4*.

La granulometria permette di descrivere la distribuzione dimensionale degli aggregati che saranno utilizzati all'interno del conglomerato bituminoso e viene rappresentata mediante una curva granulometrica che presenta nelle ascisse le aperture dei setacci utilizzati e nelle ordinate le percentuali di materiale passante ad ogni setaccio. La normativa UNI EN 13043 descrive nel dettaglio il metodo di realizzazione della setacciatura e le ulteriori prove delle tre tipologie di aggregato.

In seguito alla granulometria è stata realizzata, sul calcare 0/4, un'ulteriore setacciatura ma, in questo caso, ad con metodologia umida. Il metodo permette di eliminare dall'aggregato la frazione fine e pesare l'inerte, una volta asciugato mediante forno, in modo preciso. Con la medesima procedura ma utilizzando solo i setacci con maglia 0,125 e 0,063 viene setacciato il filler per visualizzare se al suo interno sono presenti grani di dimensioni superiori. Questi, dopo asciugatura, sono pesati.



Figura 4.4: Granulometria mediante setacciatura manuale.

4.1.5.2 Determinazione della quantità di legante nel fresato

Mediante l'utilizzo di un forno a muffola è stato possibile calcolare il contenuto di bitume nel fresato di asfalto (RAP). Ciò risulta fondamentale al fine di considerare il corretto quantitativo di bitume proveniente da RAP nelle miscele finali di progetto, da conteggiare nel dosaggio totale di legante desiderato. Viene eseguita la procedura descritta dalla normativa UNI EN 12697-39-2012 in cui si ha l'estrazione del legante da un conglomerato bituminoso mediante ignizione, cioè riscaldare a temperature superiori ai 500 °C il conglomerato in modo tale da trasformare il bitume in stato gassoso e eliminarlo. Il forno è dotato di una bilancia interna che permette di calcolare la percentuale di bitume bruciato di una

miscela attraverso la differenza tra il peso iniziale della miscela e il peso finale dell'aggregato privato del legante.

4.1.5.3 Caratteristiche fisiche degli aggregati naturali

Per gli inerti grossi, in base alla normativa UNI EN 933-4, mediante l'utilizzo di un calibro e un setaccio a barre sono state eseguite le prove per determinare l'indice di forma e il coefficiente di appiattimento dei grani.

L'indice di forma è calcolato come la massa dei granuli aventi un rapporto L/E (lunghezza grano/spessore) maggiore di 3 espresso come percentuale sulla massa secca complessiva dei granuli esaminati.

Il coefficiente di appiattimento consiste nel setacciare l'aggregato grosso con setacci ad aperture parallele. L'indice finale è calcolato come il rapporto tra la massa passante e la massa totale.

Entrambe le prove hanno lo scopo di individuare le caratteristiche degli aggregati grossolani in modo tale che non si verificano situazioni di aggregati posti parallelamente durante la compattazione o l'impiego, nel caso di aggregati spigolosi, di una maggiore quantità di bitume.

Inoltre, è stata eseguita la prova Los Angeles, rappresentata in *figura 4.5*, secondo la normativa UNI EN 1097-2 che determina la resistenza alla frammentazione degli aggregati grossi. In un cilindro rotante si posiziona un campione di 5000 g di inerti insieme ad 11 sfere in acciaio, e il tutto viene fatto roteare per 500 giri ad una velocità di circa 33 giri/min. Completata la rotazione mediante setacciatura con maglia 1,6 mm viene determinata la quantità di materiale trattenuta e rapportata con la massa iniziale di campione.

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$



Figura 4.5: Prova Los Angeles.

Per la classe di aggregati di dimensioni comprese tra 0 e 4 mm è stata realizzata, secondo normativa UNI EN 933-8, la prova di equivalente in sabbia. Questa prova vuole determinare il valore di equivalenza in sabbia della classe granulometrica 0/4 mm negli aggregati fini che contraddistingue la qualità della frazione. Il procedimento consiste nell'inserire l'inerte e una soluzione flocculante all'interno di un cilindro graduato, agitare il tutto attraverso una specifica strumentazione per rimuovere il rivestimento argilloso delle particelle. In seguito, sarà aggiunta ulteriore soluzione e il campione verrà fatto riposare per 20 minuti come in *figura 4.6*.

Il valore dell'equivalente in sabbia è calcolato come l'altezza del sedimento dopo che il campione è stato fatto riposare e viene espresso in percentuale facendo il rapporto con l'altezza totale del campione.

$$SE_{,i} = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$$

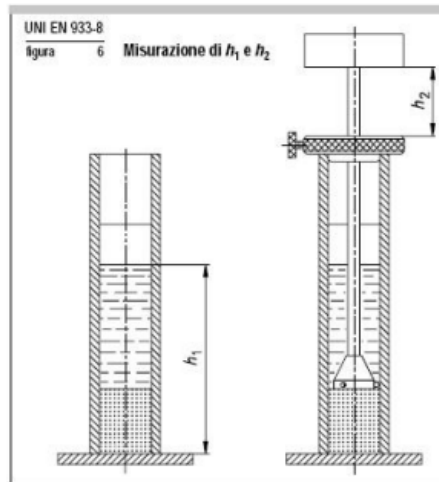


Figura 4.6: Prova equivalente in sabbia su un campione fine.

Infine, per ogni tipologia di aggregato è stata eseguito lo studio della densità volumetrica mediante l'utilizzo di un picnometro osservabile in *figura 4.7*. Nel caso di inerti di piccole dimensioni è stato utilizzato un cono metallico per visualizzare il corretto contenuto d'acqua all'interno dei grani durante la pesatura. Mediante la seguente metodologia di prova è stata individuata:

- Massa volumica apparente (ρ_a)

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

- Massa volumica effettiva (ρ_{rd})

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

- Massa volumica satura a superficie asciutta (ρ_{ssd})

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_1 - M_1)}$$

Con M_1 la massa dell'aggregato saturo a superficie asciutta, M_2 la massa del picnometro contenente il campione e l'acqua, M_3 la massa del picnometro con acqua e senza aggregato, M_4 la massa del campione asciutto.

Le densità calcolate per le varie frazioni saranno poi impiegate in fase di mix-design delle miscele.



Figura 4.7: Picnometro per il calcolo della densità degli aggregati.

4.1.5.4 Caratteristiche meccaniche del fresato

Il fresato RAP con dimensioni tra 5/10 mm è stato sottoposto ad una prova di frammentazione mediante metodo Proctor secondo quanto stabilito dal RILEM TC 237-SIB, *figura 4.8*. La prova consiste nell'inserire, in modo graduale, circa 3800 g di materiali all'interno di una fustella dove un pestello lo colpirà per 56 volte con energia costante. Una volta terminata la prova il materiale viene posto in un setaccio con apertura 1,6 mm. La frazione passante viene pesata e rapportata alla massa iniziale del fresato utilizzato. Attraverso questo procedimento è possibile studiare la friabilità dell'aggregato e mediante la pesatura si individua la perdita di fino dell'inerte stesso.



Figura 4.8: Prova PROCTOR sugli aggregati.

Anche nel caso del fresato, si è quindi proceduto all'esecuzione dei test con picnometro descritti in precedenza, così da calcolare la densità della frazione RAP 0/12 mm da utilizzare nel successivo mix-design.

4.1.5.5 Caratteristiche fisiche del bitume

Il legante vergine (bitume non modificato 70/100) è stato sottoposto ad alcune prove preliminari secondo quanto descritto nei capitoli di accettazione del CIRS, osservabili in *tabella 4.3*.

| Bitume | | | | |
|---|------------------|------------------------|-------------------|--------------------|
| <i>parametro</i> | <i>Normativa</i> | <i>unità di misura</i> | <i>tipo 50/70</i> | <i>tipo 80/100</i> |
| Penetrazione a 25°C | EN1426, CNR24/71 | dmm | 50-70 | 80-100 |
| Punto di rammollimento | EN1427, CNR35/73 | °C | 46-56 | 40-44 |
| Punto di rottura (Fraass) | CNR43 /74 | °C | ≤ - 8 | ≤ - 8 |
| Solubilità | EN 12592 | % | ≥ 99 | ≥ 99 |
| Viscosità dinamica a 160°C, $\gamma = 10s^{-1}$ | PrEN 13072-2 | Pa•s | ≥ 0,15 | ≥ 0,10 |
| Valori dopo RTFOT | EN12607-1 | | | |
| Volatilità | CNR54/77 | % | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 |
| Penetrazione residua a 25°C | EN1426, CNR24/71 | % | ≥ 50 | ≥ 50 |
| Incremento del punto di Rammollimento | EN1427, CNR35/73 | °C | ≤ 9 | ≤ 9 |

Tabella 4.3: Capitoli CIRS sul bitume.

Le prove principali sono penetrazione e rammollimento, la prima (*figura 4.9*) è descritta dalla normativa UNI EN 1426 ed è un test per determinare la consistenza del bitume definita come la penetrazione di un ago standardizzato sottoposto ad un carico di 100 g per 5 secondi in un campione ad una temperatura di 25°C. La seconda consiste, come descritto nella normativa C.N.R. - B.U. n°35/73, nel colare il bitume da testare, dentro un anello di ottone, e quindi fatto raffreddare. Si pone una sferetta d'acciaio sul bitume contenuto dentro l'anello, che viene riscaldato a bagnomaria in condizioni controllate, fino alla temperatura alla quale il peso della sferetta provoca il cedimento del bitume (*figura 4.10*). ^{[25][30][31]}

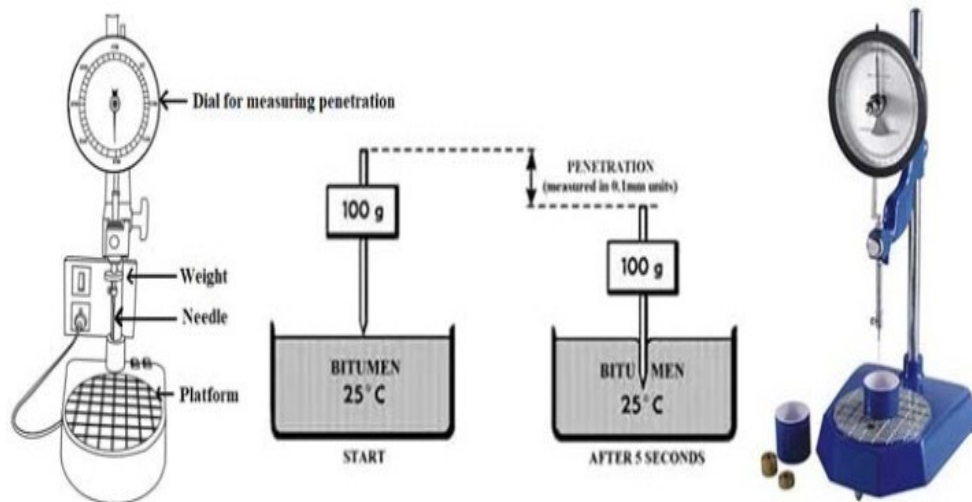


Figura 4.9: Prova di penetrazione bitume.

C.N.R. - Bollettino Ufficiale (Norme tecniche) - A. VII - N. 35

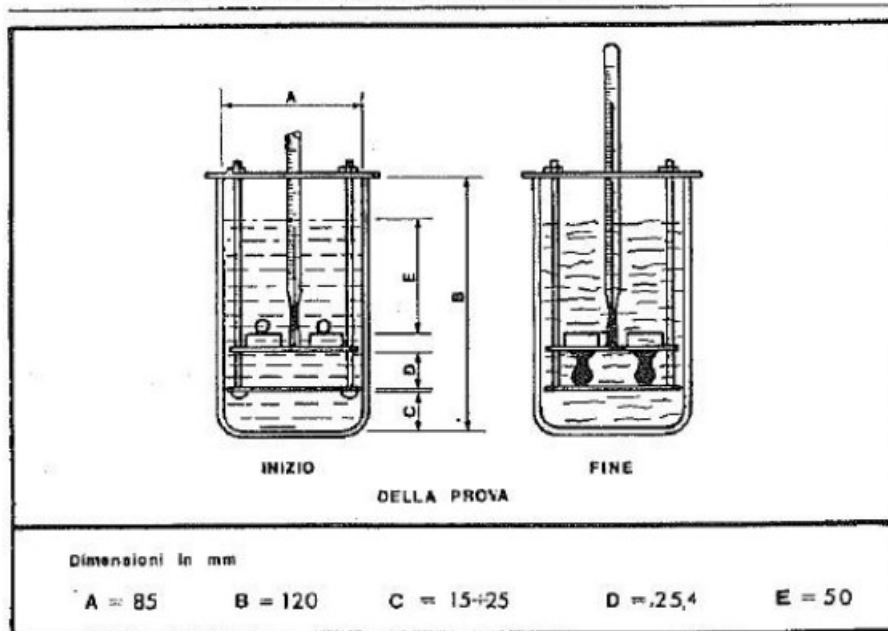


Figura 4.10: Prova di rammollimento bitume.

Per il legante invecchiato estratto dal fresato non è stato possibile eseguire le stesse prove preliminari per via delle quantità disponibili in laboratorio (l'estrazione ha richiesto notevole tempo per ottenere la sola quantità necessaria alle fasi sperimentali successive). Per tale motivo, si rimandano le considerazioni sul bitume invecchiato alle seguenti fasi di analisi reologica dei leganti. [31]

4.2 Caratterizzazione dei leganti

L'obiettivo della caratterizzazione a scala legante è stato quello di andare a determinare il quantitativo ottimale di ringiovanente da introdurre nel conglomerato bituminoso riciclato contenente RAP. In secondo luogo, la sperimentazione ha permesso di validare una procedura di ottimizzazione di tale quantità, sulla base delle prestazioni dei bitumi, in accordo con quanto stabilito dal protocollo RILEM. Le principali fasi della sperimentazione sono di seguito riassunte:

- produzione di composti (bitume riciclato + ringiovanente) a diversi quantitativi di ringiovanente;
- analisi delle prestazioni dei composti, in comparazione con quelle del bitume vergine;
- calcolo della percentuale ottimale di ringiovanente sulla base delle prestazioni misurate;
- confezionamento di blend con quantitativo ottimale di ringiovanente (bitume vergine + bitume invecchiato + ringiovanente in quantità ottimale);
- analisi prestazionale dei blend, in comparazione al bitume vergine, a diversi gradi di invecchiamento;
- validazione del protocollo RILEM suggerito.

4.2.1 Materiali e confezionamento dei campioni

Con riferimento ai materiali impiegati in questa fase della sperimentazione, si riporta un elenco di codici materiale, funzionale alla comprensione delle operazioni eseguite:

- VB: bitume vergine 70/100;
- RAB: bitume invecchiato estratto dal RAP;
- ARA: additivo ringiovanente;
- REF: legante di riferimento, costituito da solo VB (REF = VB);
- REJ: composto bitume invecchiato e ringiovanente (RAB + ARA, ARA in quantità variabili);
- OAD: quantitativo di ringiovanente ottimale;

- RBL; blend composto da bitume vergine, bitume invecchiato e ringiovanente in quantità ottimale (VB+RAB+OAD).

Come anticipato la prima fase ha visto il confezionamento di composti REJ (bitume invecchiato + ringiovanente) con differenti percentuali di additivo al suo interno: 0%, 2%, 5% 8% rispetto al peso del bitume RAB (estratto dal RAP selezionato). A tal fine, la miscelazione è avvenuta riscaldando il bitume a 160 °C per 3 ore, e aggiungendo in seguito l'additivo ringiovanente a temperatura ambiente. Il composto è stato mescolato manualmente per cinque minuti al fine di favorirne l'omogenizzazione. Infine, esso è stato colato in appositi stampi siliconici per la produzione di campioni cilindrici di misura indicativa di 8 e 25 mm di diametro, e 2 e 1 mm di spessore, rispettivamente. I campioni sono funzionali all'esecuzione delle prove reologiche per l'analisi delle prestazioni dei leganti che saranno descritte al successivo paragrafo.

Una volta ottimizzata la quantità di ringiovanente, si sono replicate le stesse operazioni per ottenere i blend riciclati (RBL=VB+RAB+OD) e di riferimento (REF). La *figura 4.11* illustra alcune operazioni di colatura dei campioni.



Figura 4.11: Campioni di bitume per la prova DSR.

Nello specifico, una parte di materiale è stato colato immediatamente per la produzione dei campioni, e i successivi test in condizioni non invecchiate. La rimanente parte è stata invece trattata in laboratorio con procedura di invecchiamento a breve termine RTFO (Rolling Thin Film Oven). Essa consiste in una procedura di invecchiamento/condizionamento per i leganti bituminosi utilizzati nella produzione di conglomerati a caldo. La normativa di riferimento è la UNI EN 12607 in cui l'invecchiamento a breve termine è considerato come rappresentativo dell'invecchiamento dovuto alle fasi di manipolazione, miscelazione, stoccaggio e posa in opera del conglomerato. La prova viene eseguita inserendo il bitume all'interno di appositi recipienti cilindrici in vetro (figura 4.12) che saranno inseriti nel forno precisamente in una piastra verticale rotante ad una velocità di 15 giri al minuto. Il forno viene riscaldato alla temperatura di 163° per 75 minuti ed è dotato di ventole per assicurare una temperatura omogenea e di un getto d'aria calda con portata di 4000 ml al minuto che “colpisce” uno alla volta i recipienti nella piastra rotante, figura 4.13. [33][34]



Figura 4.12: Recipienti in vetro dopo la prova RTFOT.

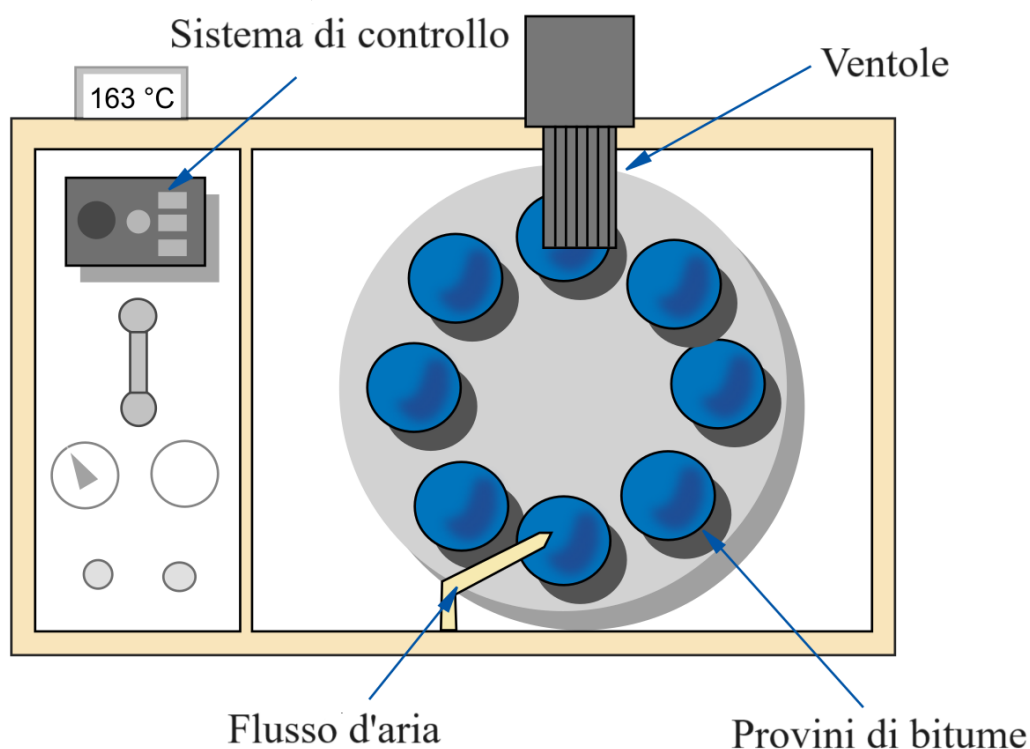


Figura 4.13: Rappresentazione strumentazione prova RTFOT.

Una volta eseguito l'invecchiamento a breve termine, una parte di materiale è stata colata per la produzione dei campioni cilindrici e l'esecuzione dei test reologici. La restante parte è stata trattata con procedura di invecchiamento a lungo termine in laboratorio (PAV – Pressure Aging Vessel). Essa è eseguita su bitumi e leganti che sono già stati condizionati da un invecchiamento a breve termine. La normativa di riferimento è la UNI EN 14769 in cui l'invecchiamento a lungo termine mediante prova PAV simula il condizionamento che un legante bituminoso subisce durante la vita utile di servizio di una pavimentazione di conglomerato bituminoso. Nella prova PAV il bitume, preventivamente sottoposto a RTFOT, viene inserito in provini circolari che sono impilati realizzando un cilindro, osservabile in *figura 4.14*. Il cilindro con i provini viene posto in una cella riscaldata a 90, 100 o 110°C che viene pressurizzata con aria a 20 atm e invecchiata per 20 ore. La temperatura di prova dipende dalle condizioni climatiche che si vogliono rappresentare. ^{[32][33][34]}



Figura 4.14: Rappresentazione strumentazione prova PAV.

Dopo l'esecuzione della procedura PAV, il legante è stato colato producendo i campioni cilindrici da avviare alla sperimentazione.

Il medesimo percorso di produzione ed invecchiamento è stato poi replicato anche su legante di riferimento REF. Ciò ha permesso di effettuare l'analisi reologica prestazionale sui leganti in termini comparativi tra REF (blend di riferimento = VB) e RBL (blend ricilato = VB+RAB+OAD).

4.2.2 Test reologici a scala legante

Tutti i leganti prodotti, ai diversi stadi di invecchiamento, sono stati analizzati da punto di vista delle prestazioni reologiche mediante reometro a taglio dinamico (DSR – Dynamic Shear Rheometer), in accordo con la norma EN 14770, determinando il modulo complesso G^* e l'angolo di fase δ in presenza di carico sinusoidale a diverse condizioni di prova.

Con il termine modulo complesso, indicativo della rigidità del materiale, si intende il rapporto tra la sollecitazione massima τ e la deformazione massima γ , entrambe determinate applicando sul campione un carico di oscillazione sinusoidale, come si osserva in *figura 4.15*.

L'angolo di fase è la differenza di fase tra l'onda di carico e la deformazione del provino durante il test e riassume le caratteristiche di visco-elasticità del materiale.

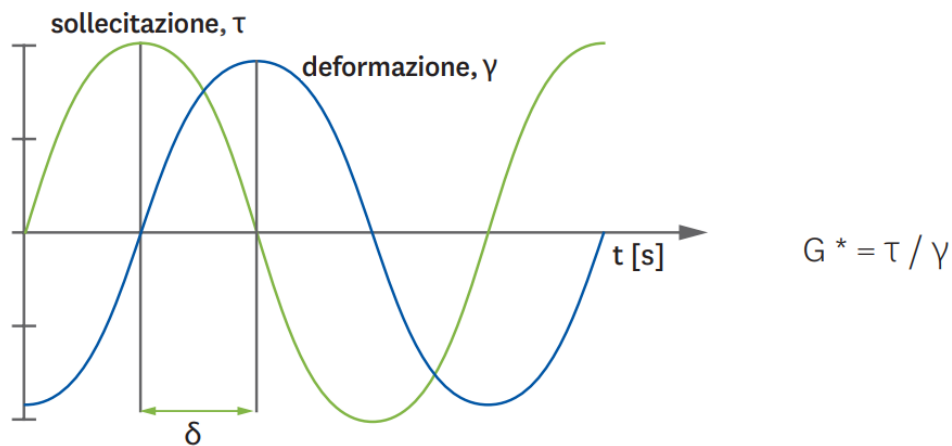


Figura 4.15: Rappresentazione sollecitazione e deformazione mediante prova DSR.

Per ogni campione si sono realizzate due metodologie di prova differenti:

- AS (*amplitude sweep*), il test viene eseguito mediante carichi ciclici ripetuti con temperatura e frequenza fissate, e ampiezza della deformazione crescente. Il risultato della prova permette di osservare la variazione del modulo complesso G^* all'aumentare della deformazione nel provino. In questo modo si individua, come in *figura 4.16*, una curva in cui si identifica la deformazione limite visco-elastico lineare, sotto la quale è necessario testare le prestazioni reologiche dei materiali (tale limite viene comunemente localizzato quando il modulo complesso comincia a decrescere – dal punto di vista analitico, esso si individua in corrispondenza di un decremento del 5% rispetto al modulo iniziale costante). Le configurazioni di prova sono state settate funzionalmente a quelle da eseguire nella successiva prova di frequency sweep descritta di seguito.

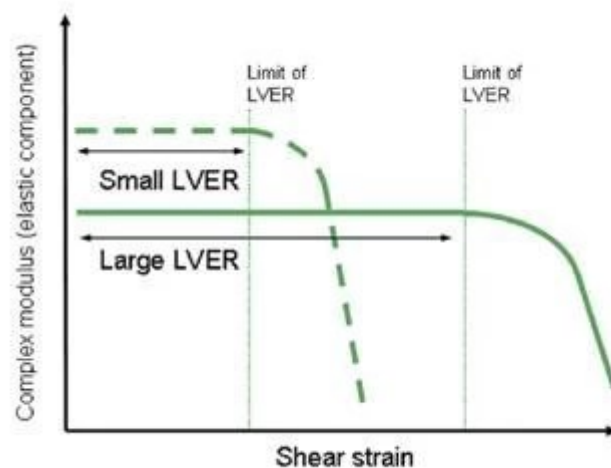


Figura 4.16: Variazione modulo complesso G^* all'aumentare della deformazione.

- FS (*frequency sweep*), il seguente test permette di descrivere il comportamento del campione dipendente dal tempo (frequenza variabile) nell'intervallo di frequenze selezionato. Le alte frequenze sono utilizzate per simulare delle sollecitazioni rapide su tempi brevi, mentre le frequenze basse simulano sollecitazioni lente su scale temporali lunghe. Le frequency sweep sono metodi per raccogliere informazioni sul comportamento interno del bitume e sulla sua stabilità a lungo termine. I risultati sono presentati in un diagramma, come in *figura 4.17*, con la frequenza (angolare) sull'asse delle ascisse e il modulo complesso sull'asse delle ordinate. La deformazione viene mantenuta costante, al di sotto del limite visco-elastico lineare precedentemente identificato.

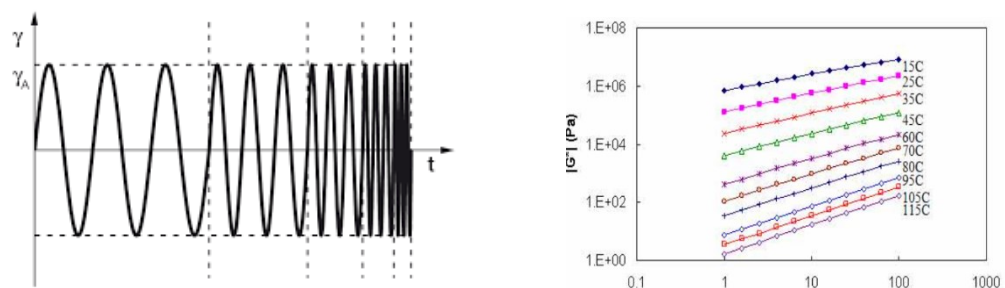


Figura 4.17: Sollecitazioni ad alte frequenze e variazione modulo complesso con la frequenza.

La prova viene eseguita mediante una strumentazione specifica osservabile in *figura 4.18* e consiste nell'inserire i campioni cilindrici di legante tra due piatti aventi dimensioni corrispondenti a 8 o 25 mm (la dimensione più piccola viene

impiegata alle basse temperature di indagine, quando il materiale risulta più rigido, e viceversa). La superficie in cui viene posizionato il provino è riscaldabile e permette, come descritto in precedenza, di eseguire il test a temperature differenti. Il piatto superiore viene posto a contatto con il campione ed esercita la sollecitazione rotazionale oscillatoria, registrando la resistenza del materiale. Ciò permette di definire gli sforzi e le deformazioni, e il successivo calcolo del modulo complesso e dell'angolo di fase*. [35]

In accordo con quanto stabilito dal protocollo RILEM, le prove FS sono state impostate per la misurazione delle seguenti configurazioni (deformazione sempre costante, pari a 0.5%, dopo verifica del limite visco-elastico lineare):

- G^* a 28 °C, 1.59 Hz, con geometria da 25 mm, su REF, REJ, RBL non invecchiati, su REF, RBL invecchiati RTFO, su REF e REJ invecchiati PAV;
- G^* a 58 °C, 1.59 Hz, con geometria da 25 mm, su REF, RBL invecchiati RTFO;
- G'' a 8 °C, 1.59 Hz, con geometria da 8 mm, su REF, RBL invecchiati PAV (G'' rappresenta la componente viscosa di G^*).



Figura 4.18: Strumentazione test DSR.

4.3 Produzione delle miscele

Il conglomerato bituminoso è un materiale costituito da una miscela di aggregati di diversa granulometria (tra i quali filler, sabbia e pietrisco) e un legante. All'interno del materiale si prevede anche l'aggiunta di polimeri o resine sintetiche con lo scopo di modificarne le caratteristiche fisiche e/o chimiche. Il conglomerato bituminoso è utilizzato per la realizzazione delle superfici carrabili come strade, autostrade, piste aeroportuali, ecc. La miscela di conglomerato bituminoso è realizzata inserendo all'interno del mixer gli aggregati, il bitume modificato o non modificato in base al risultato che si vuole ottenere.

4.3.1 Mix-design delle miscele

La fase di mix-design ha avuto l'obiettivo di proporzionare in modo efficace i costituenti delle miscele prodotte. La procedura è stata eseguita in accordo con quanto stabilito dal Capitolato Tecnico della Provincia di Bolzano. Le fasi delle operazioni possono essere riassunte come di seguito.

1. Costruzione delle curve granulometriche di tutte le frazioni di aggregato analizzate (calcare 8/12 mm, calcare 4/8 mm, calcare 0/4 mm, filler calcareo < 0.063 mm, fresato 0/12 mm).
2. Combinazione delle varie pezzature secondo proporzioni specifiche, al fine di ottenere una granulometria finale delle miscele che fosse rispondente al fuso granulometrico accettabile stabilito dal Capitolato. La miscela selezionata riguarda uno strato di usura avente dimensione nominale massima dell'aggregato pari a 12 mm. In questa fase, si sono costituite due curve granulometriche finali: la prima, comprensiva di tutte le frazioni calcaree, per la produzione delle miscele di riferimento (di seguito indicate come BASE); la seconda, comprensiva di tutte le frazioni granulometriche calcaree e del fresato, per la produzione delle miscele riciclate (di seguito indicate con il prefisso R).
3. Selezione del dosaggio ottimale di bitume, secondo quanto stabilito dal Capitolato Tecnico di riferimento. Sulla base di tale valore, si è pervenuti:
i) alla quantità di bitume vergine da introdurre nella miscela di riferimento (BASE), pari al dosaggio ottimale di bitume; ii) alla quantità di bitume vergine da introdurre nelle miscele riciclate, pari al dosaggio ottimale di bitume meno la quantità di bitume invecchiato già contenuto nel fresato, in funzione della quantità di fresato introdotto nel conglomerato (percentuale di riciclo del fresato fissata al 60%).
4. Determinazione della quantità ottimale di ringiovanente da introdurre nella miscela. Secondo quanto usualmente eseguito in scala di produzione, l'additivo (liquido) non è stato conteggiato nel mix-design dei conglomerati.

In seguito, come già accennato, le miscele riciclate sono state confezionate con quantità variabili di additivo ringiovanente al fine di valutarne gli effetti in funzione del suo contenuto, variando il quantitativo di un $\pm 30\%$ (rispetto al peso dell'aggregato). Riassumendo le fasi descritte, si è pervenuti alle 4 tipologie di conglomerato bituminoso di seguito indicate:

- 1-BASE, conglomerato bituminoso contenente aggregati calcarei e bitume vergine 70/100. Non viene inserito nella miscela il RAP e di conseguenza neanche l'additivo ringiovanente;
- 2- ROPT, conglomerato bituminoso contenente RAP, aggregati calcarei, bitume vergine e quantitativo ottimale di additivo ringiovanente;
- 3- ROPT⁻³⁰, conglomerato bituminoso contenente RAP, aggregati calcarei, bitume vergine e quantitativo di additivo ringiovanente ridotto del 30% rispetto a quello ottimale;
- 4- ROPT⁺³⁰, conglomerato bituminoso contenente RAP, aggregati calcarei, bitume vergine e quantitativo di additivo ringiovanente incrementato del 30% rispetto a quello ottimale;

Si specifica che i dettagli di calcolo della procedura saranno esposti al successivo Capitolo 5 dell'elaborato.

4.3.2 Confezionamento dei campioni

Si descrivono di seguito le tecniche di compattazione impiegate per il confezionamento dei campioni. Funzionalmente alla successiva caratterizzazione prevista, si sono prodotti campioni cilindrici e prismatici. Le dimensioni dei provini sono state selezionate sulla base dei calcoli eseguiti in fase di mix-design, imponendo, per tipologia di miscela, un valore di vuoti obiettivo pari al 5% (note le proporzioni di tutti i costituenti, è stato possibile calcolare la densità massima a 0% vuoti, dalla quale si è determinata la quantità di materiale da impiegare per produrre campioni aventi vuoti del 5% con le dimensioni desiderate). Si specifica che l'additivazione del ringiovanente viene eseguita con metodologia *wet*, ovvero integrando l'additivo nel bitume, che successivamente viene miscelato (a 160 °C) alla miscela di aggregati (aggregati vergini + fresato).

4.3.2.1 Compattazione con pressa giratoria

Ogni tipologia di conglomerato bituminoso è stata compattata mediante pressa a taglio giratoria (SGC, *Superpave Gyrotory Compactor*) secondo la normativa EN-12697-31-2007. La pressa permette di stimare la densità che corrisponde a una

compattazione impostata nel nostro caso al 95% (con 5% di vuoti). Questo valore è determinato simulando il livello di compattazione che generalmente viene raggiunto in sito utilizzando i rulli compattatori.

Per ottenere la seguente densità si calcola l'altezza del provino che contiene il 5% dei vuoti, una volta compattato mediante 100 giri della pressa. Nel seguente studio i provini cilindrici di diametro 10 cm, osservabili in *figura 4.19*, sono realizzati con un'altezza finale di 8 cm. Mediante la medesima pressa e metodo sono stati realizzati anche provini di diametro 15 cm e altezza 6 cm. Per i campioni con altezza pari a 8 cm, è stato previsto successivamente un taglio orizzontale con sega circolare, così da ottenere 2 provini di prova (10 cm di diametro, 4 cm di altezza) da ogni singola compattazione.

Il conglomerato viene estratto dal mixer ad alte temperature e posto in apposite fustelle di dimensioni standardizzata, *figura 4.20*, (di 10 cm di diametro o 15 cm in base al campione da realizzare) che sono inserite all'interno della pressa.

La pressa a taglio giratoria, osservabile in *figura 4.21*, permette di compattare la miscela sfruttando un carico applicato con pressione costante a 600 kPa e un moto rotatorio a velocità costante di 30 giri/min. La combinazione dei due permette, ad ogni rotazione, sia un riassetamento e una ridistribuzione degli aggregati sia un aumento della densità.



Figura 4.19: Provini realizzati mediante compattazione con SGC.



Figura 4.20: Fustella per realizzazione provini mediante SGC.



Figura 4.21: Superpave Gyratory Compactor (SGC).

4.3.2.2 Compattazione mediante rullo

In tale fase, sono state realizzate, per ogni tipologia di conglomerato bituminoso, delle lastre di dimensioni 300x400 mm, con un'altezza di 5 cm, mediante il compattatore a rullo (*roller compactor*) secondo la normativa UNI ENI 12697-33-2007. Il conglomerato, dopo la miscelazione, viene inserito in un cassero di dimensioni standardizzate, *figura 4.22*, precedentemente riscaldato in forno. Il cassero, una volta riempito, viene posto all'interno del compattatore a rullo dove viene eseguita la compattazione della miscela mediante passi di carico. Il rullo applica dei carichi progressivamente crescenti con una forza massima pari a 28 KN, simulando la compattazione in sito attraverso i mezzi di cantiere. ^[40]

Nella tabella seguente sono riportati i passi di carico del *roller compactor* per realizzare una lastra di dimensioni 300x400x50 mm.

| Passo di carico | Forza applicata (KN) | Numero di passate |
|-----------------|----------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 4 |
| 2 | 3 | 4 |
| 3 | 7 | 4 |
| 4 | 11 | 4 |
| 5 | 15 | 4 |
| 6 | 19 | 5 |
| 7 | 23 | 7 |
| 8 | 28 | 7 |

Tabella 4.4: Passi di carico del roller compactor.

Lo scopo è ottenere una lastra la cui densità sia pari alla densità di progetto calcolata in precedenza. Conoscendo il volume finale dopo la compattazione e la densità ottenuta mediante il mix-design, si può ottenere la massa di conglomerato bituminoso da inserire all'interno del cassero per eseguire la compattazione.

Terminata la prova si estrae la lastra, *figura 4.23*, e si attende che si raffreddi per poi procedere alla separazione del campione dal cassero.



Figura 4.22: Cassero per Roller Compactor.



Figura 4.23: Lastra conglomerato bituminoso dopo Roller Compactor.

4.4 Caratterizzazione delle miscele

Nel seguente paragrafo sono descritte le diverse prove eseguite sui provini di conglomerato bituminoso realizzati mediante le tecniche di compattazione descritte.

4.4.1 Proprietà volumetriche delle miscele

I provini, di entrambi i diametri, sono stati misurati per determinare altezza, diametro e massa in modo tale da ricavare la densità secondo la normativa UNI EN 12697-6-2012.

I campioni con diametro pari a 100 mm sono stati tagliati in modo da dimezzare l'altezza ottenendo provini di dimensioni 100x40 mm.

La normativa, seguendo la procedura geometrica, fornisce una formula semplice per definire la densità sia per provini prismatici (1), ottenuti dalle lastre mediante la compattazione a rullo, sia per i provini cilindrici (2).

$$\gamma_{PR} [g/cm^3] = \frac{m}{l \cdot w \cdot h} \quad (1)$$

$$\gamma_{CY} [g/cm^3] = \frac{m}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h} \quad (2)$$

Con m [g] la massa del provino compattato, d [cm] il diametro e h [cm] l'altezza. Si osservi che sia il diametro che l'altezza dei provini sono stati calcolati come media aritmetica di quattro valori misurati mediante calibro digitale.

In seguito, insieme ai campioni di diametro 150 mm, sono stati posti in dei recipienti contenenti acqua per un giorno così da eliminare l'aria nei vuoti e ottenere un campione saturo.

Il giorno seguente è stato possibile determinare la massima volumica apparente mediante metodo SSD (*Saturated Surface Dry*). Tale procedura, rispetto alla geometrica, non considera i vuoti della superficie esterna del campione come parte del volume del provino. La prova consiste nel pesare il campione saturo posizionato mediante un "castello" (*figura 4.24*) in sospensione all'interno di un contenitore ripieno d'acqua, in modo da rispettare la legge di Archimede (differenza tra la massa del provino e la massa dell'acqua spostata dallo stesso).

Eseguita la pesatura il campione viene estratto dal recipiente ed asciugato esternamente in modo che la superficie sia asciutta ma i vuoti al suo interno siano saturi. In seguito, viene ripesato ottenendo il valore del campione saturo a superficie asciutta.

I valori ottenuti sono inseriti nella seguente formula per calcolare la densità:

$$\rho_{b,SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w$$

Con m_1 [g] massa del provino asciutto, m_2 [g] massa del provino in acqua, m_3 [g] massa del provino saturo a superficie asciutta e ρ_w [kg/m³] massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

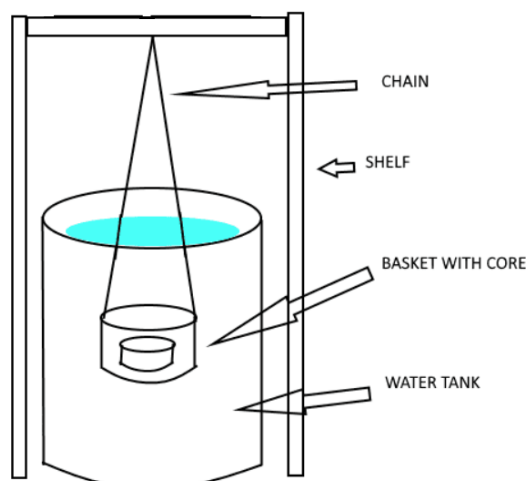


Figura 4.24: Castello per pesatura in acqua del provino saturo.

La massa dei provini, realizzati mediante pressa a taglio giratoria, è stata calcolare in modo tale da ottenere una percentuale di vuoti a fine compattazione (100 cicli) pari al 5%. Questo calcolo è stato possibile conoscendo le dimensioni finale del campione e la densità dei materiali utilizzati. La pressa ad ogni ciclo compatta il materiale diminuendo le dimensioni del campione fino al valore determinato e di conseguenza riduce la percentuale di vuoti. Dato che le miscele realizzate si differenziano per la presenza del fresato, si avranno differenze nelle curve di compattazione e nella percentuale di vuoti finali dovute ad un diverso posizionamento dei grani. Il valore dei vuoti viene stabilito dai capitolati in base al tipo di strato dell'infrastruttura viaria che si vuole realizzare.

4.4.2 Caratteristiche meccaniche delle miscele

La prova ITS o a trazione indiretta, descritta nella normativa UNI EN 12697-23, consiste nella rottura del provino tramite l'applicazione di un carico di compressione verticale che varia in modo monotono con una predefinita velocità di spostamento.

La prova viene eseguita mediante la stessa apparecchiatura della prova Marshall ma il carico è trasferito al campione mediante due listelli, *figura 4.25*, di dimensioni standardizzate:

- Larghezza = 15 ± 2 mm;
- Spessore = 4 ± 1 mm;

- Lunghezza \geq della lunghezza della linea di contatto del provino.

Durante la prova il campione viene posto, in maniera centrata, tra le teste di carico della pressa che sono fatte avanzare ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. Il sistema, mediante sensori, permette di misurare sia la deformazione (verticale e orizzontale) sia il carico.

La ITS, resistenza a trazione indiretta, del provino può essere calcolata come:

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot h}$$

Con P il carico massimo, D il diametro del provino e h l'altezza del provino.

La normativa specifica che i provini per effettuare la prova devono essere condizionati ad una temperatura di 25°C e il test deve essere eseguito entro 2 minuti dall'estrazione del campione dalla cella termica. Nel nostro caso si sono utilizzati provini di diametro 100 mm con una temperatura di prova pari a 5°C per visualizzare la resistenza del materiale alle basse temperature ed una velocità del pistone di 12,5 mm/min. [36]



Figura 4.25: Esecuzione prova ITS.

4.4.3 Rigidezza delle miscele

I provini di conglomerato bituminoso di varie dimensioni realizzati mediante la compattazione descritta nel capitolo precedente sono utilizzati per determinare il modulo di rigidezza della miscela mediante la prova ITSM (*Indirect Tensile Stiffness Modulus*).

Il test, descritto in normativa UNI EN 12697-26, fornisce come risultato il modulo di rigidezza che rappresenta la capacità del conglomerato di ridistribuire le tensioni agli strati sottostanti della pavimentazione stradale. Infatti, il modulo è la proprietà ingegneristica razionale che lega tensioni e deformazioni. Maggiore è il suo valore e maggiore è la capacità di ridistribuire le tensioni.

La prova impiega un macchinario che permette di simulare il passaggio veicolare mediante sollecitazioni dinamiche sul provino, osservabile in *figura 4.26*. La strumentazione è composta da un sistema pneumatico ad aria compressa che viene posto a contatto con un provino. Il pistone esercita sul campione per 5 volte uno sforzo verticale impulsivo con un tempo di crescita pari a $124 \text{ ms} \pm 4$ (da 0 a picco), *figura 4.27*, tale che il valore massimo raggiunto crei una deformazione orizzontale di $7 \mu\text{m} \pm 2$ se il diametro del provino è di 150 mm e di $5 \mu\text{m} \pm 2$ se il diametro è di 100 mm.

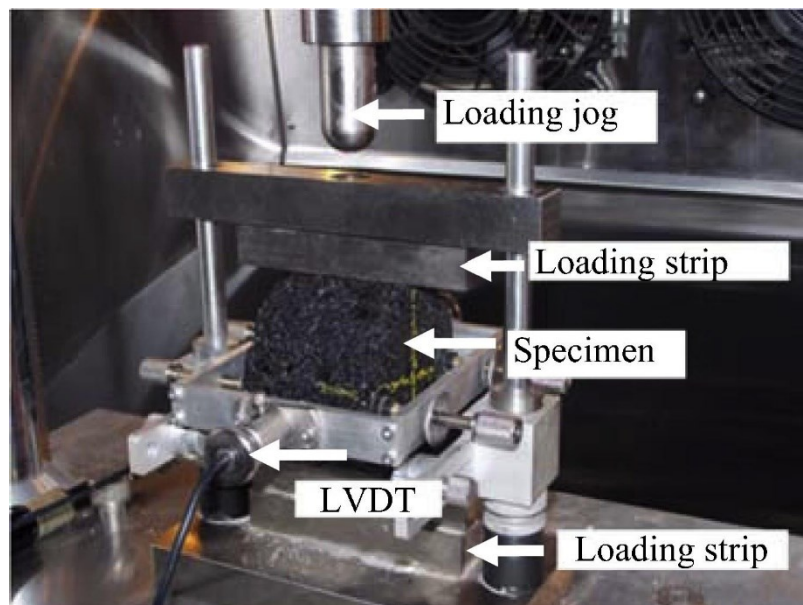


Figura 4.26: ITSM.

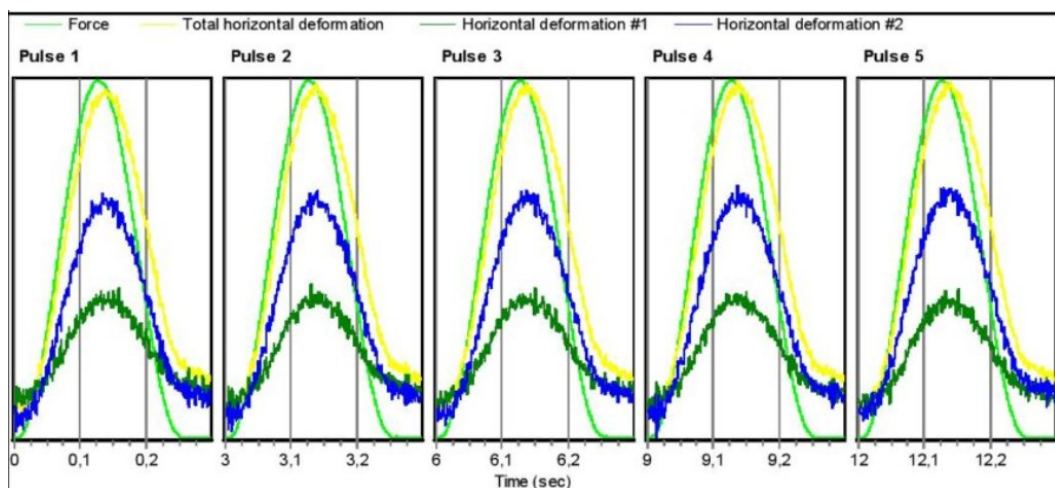


Figura 4.27: Peak Load ITSM.

Essendo la geometria del provino nota e la forza e la deformazione misurate, il software calcola automaticamente la tensione massima raggiunta e il modulo di rigidezza ad ogni ciclo di carico.

La prova viene eseguita con le stesse modalità ruotando il campione di 90° in modo da sollecitare il diametro ortogonale rispetto al precedente e il risultato finale sarà la media dei moduli di rigidezza ottenuti nei 10 cicli totali.^[37]

Unitamente ai suddetti test, si sono eseguite ulteriori prove per la determinazione della rigidezza dei conglomerati. Le lastre prodotte mediante compattatore a rullo sono state tagliate in travetti (campioni prismatici) di dimensione 400x40x50 mm in modo da essere sottoposte alla prova 4PB (*Four Point Bending Test*), in accordo con la norma EN 12697-26. La prova 4PB permette di simulare la flessione della pavimentazione causata dai passaggi veicolari. Il test, come si osserva in *figura 4.28*, consiste nel disporre il campione di conglomerato bituminoso su quattro punti di appoggio distanziati di 118,5 mm. Il provino viene immerso sugli appoggi e, tramite due pistoni di carico situati in corrispondenza dei due appoggi centrali, esso viene sollecitato (in controllo di tensione o deformazione) mediante carichi sinusoidali a frequenze e ampiezze variabili.

Nella presente sperimentazione, la flessione verticale viene eseguita imponendo una deformazione di 50 micron, in accordo con quanto suggerito dalla suddetta norma europea, misurando la forza necessaria per imporre tale deformazione. Nota la geometria del campione, è possibile quindi calcolare il modulo di

rigidezza complesso del materiale, riportando anche il corrispondente angolo di fase (ritardo tra il segnale di deformazione e la lettura della tensione, che indica le proprietà viscoelastiche del materiale). Le prove sperimentali sono state eseguite ad una temperatura costante di 25 °C, variando la frequenza del carico sinusoidale nell'intervallo 0.1-20 Hz. In accordo con la normativa tecnica e la letteratura scientifica di settore, le proprietà viscoelastiche dei materiali studiati sono state calcolate in corrispondenza del 100esimo ciclo di carico (alla fine di un adeguato periodo iniziale di assestamento del materiale).

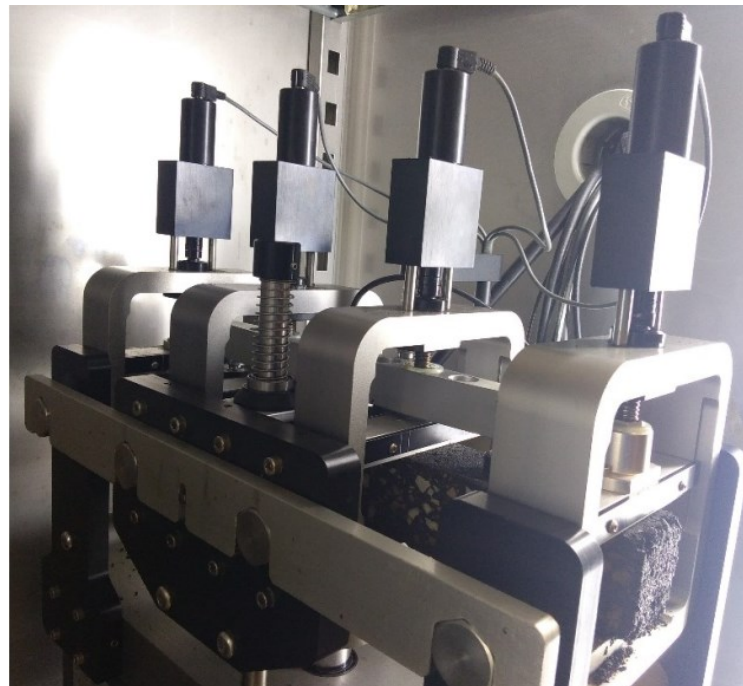
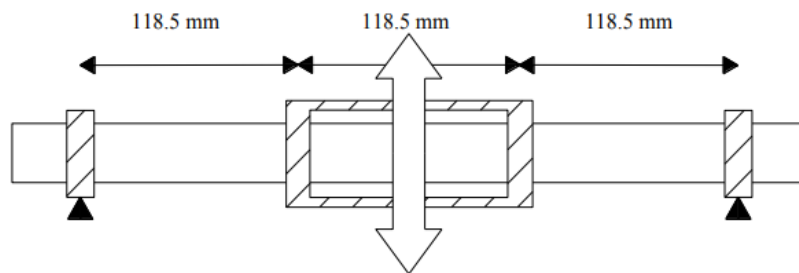


Figura 4.28: Four Point Bending Test.

4.4.4 Resistenza alle deformazioni permanenti delle miscele

La prova RLAT o prova di compressione assiale ciclica, secondo la normativa britannica British Standard DD 226:1994, si utilizza per determinare la resistenza del conglomerato bituminoso all'accumulo di deformazioni permanenti. Il test consiste in un carico assiale di 100 kPa applicato ciclicamente sul provino cilindrico ad una temperatura di 40 °C (l'accumulo di deformazione è tipico delle alte temperature di esercizio).

Il sistema, composto da un pistone ad aria compressa, applica su una piastra di 100 mm di diametro posta sulla superficie superiore del campione in esame il carico per il tempo di un secondo immediatamente seguito da un tempo di riposo di durata identica. La prova è eseguita su campioni cilindri aventi diametro pari a 15 cm; dunque, la piastra (10 cm) esercita la pressione in un'area parziale rispetto a quella del campione, simulando gli effetti di confinamento che sono nelle porzioni sollecitate di pavimentazioni in esercizio. La tensione applicata si può ricondurre ad un'onda quadrata come quella riportata in *figura 4.29*.

La prova dura per un numero totale di cicli di 1800 con un periodo complessivo di 3600 secondi.

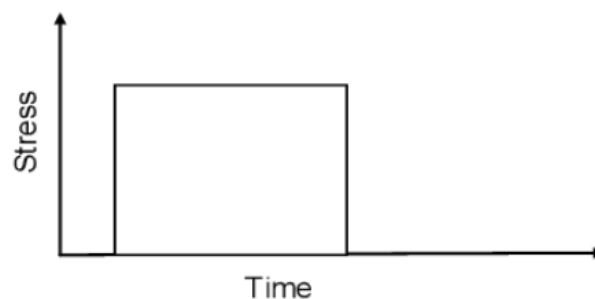


Figura 4.29: Ciclo di carico RLAT

In *figura 4.30* è possibile visualizzare la configurazione del test eseguito, nel nostro caso si può osservare come il carico sia applicato mediante una piastra di dimensioni inferiori al campione in modo da simulare il confinamento laterale della pavimentazione stradale e rendere la prova più verosimile. Nello specifico della sperimentazione, i conglomerati bituminosi differenti sono stati sottoposti a tensioni assiali pari a 100, 300, 500 kPa alla temperatura di 60 °C, in modo da

promuovere l'accumulo di deformazione sino all'eventuale cedimento dei materiali.

La deformazione assiale, misurata mediante la prova attraverso due sensori, è definita dalla seguente formula:

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100$$

In cui si ha che la deformazione assiale (ε_h) in percentuale è pari al rapporto tra l'accorciamento misurato dopo i cicli di carico (Δh) e l'altezza iniziale del provino (h_0). [38]

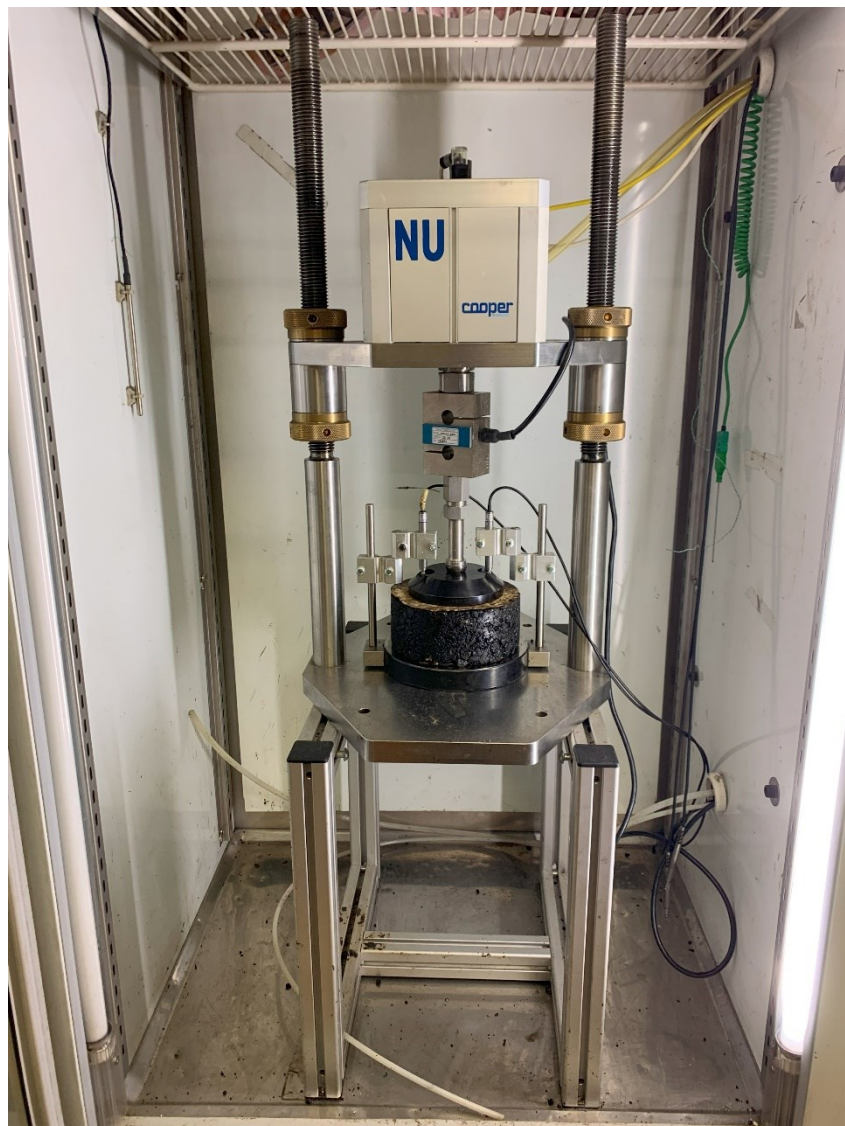


Figura 4.30: Esecuzione prova RLAT

Infine, le lastre di conglomerato bituminoso realizzate mediante compattazione a rullo sono sottoposte a prove di *Wheel Tracking* per determinare la tendenza dei materiali bituminosi a deformarsi in modo plastico (fenomeno ancora relativo all'accumulo di deformazione permanente).

La prova, descritta in normativa UNI EN 12697-22, consiste nel posizionamento della lastra di dimensioni 300x400 mm all'interno del macchinario in cui si avrà una fase di condizionamento del provino alla temperatura di 60°C. In seguito, uno pneumatico di larghezza pari a 50 mm realizzato in gomma solida con durezza e carico prefissati simula il passaggio veicolare sulla lastra deformandola (*figura 4.31*). La suscettibilità del materiale bituminoso è stimata mediante la profondità del solco (l'ormaia) realizzata dai passaggi del ruotino.

Si imposta la prova con un numero massimo di cicli pari a 10000 (andata e ritorno dello pneumatico) e una deformazione massima della lastra di 20 mm.

Il test ci fornisce come risultato la deformazione eseguita dopo 10000 cicli o nel caso più sfavorevole il numero di cicli che ha portato ad una deformazione di 20 mm. Mediante grafici è possibile osservare l'andamento della deformazione all'aumentare dei passaggi del ruotino. ^[39]



Figura 4.31: Wheel Tracking Method

4.4.5 Resistenza a fatica delle miscele

Utilizzando i campioni prismatici (travetti) e la configurazione di prova di flessione su 4 punti già descritti, si sono eseguiti anche alcuni test di fatica.

In particolare, a valle delle prove di flessione 4PB eseguite per la determinazione della rigidità e dell'angolo di fase (non distruttive), i campioni sono stati sottoposti a prove di fatica in controllo di deformazione. Imponendo di volta in volta ampiezze delle deformazioni flessionali nell'intervallo 100-500 microstrain, l'applicazione della flessione è stata ripetuta ciclicamente per monitorare l'insorgere di dissesti dovuti a fenomeni di fatica, in accordo con la norma EN 12697-24. Durante i test (eseguiti a frequenza costante pari a 10 Hz e alla temperatura di 25 C°) si sono monitorati i valori del modulo di rigidità e dell'angolo di fase in funzione del numero di cicli applicati, sino al raggiungimento di uno specifico istante identificato come termine della vita utile del campione (si è arbitrariamente deciso di considerare tale punto in corrispondenza del raggiungimento di un valore di rigidità pari al 50% del suo valore iniziale). Replicando svariati test a diversi livelli deformativi, sui diversi campioni a disposizione, è stato infine possibile costruire la curva di fatica delle miscele (ampiezza della deformazione vs. numero di cicli a rottura).

CAPITOLO 5

Risultati della sperimentazione

Il seguente capitolo riporterà e commenterà i risultati delle prove eseguite sui materiali utilizzati all'interno dell'analisi sperimentale. In particolare, ci si soffermerà sul confronto dei dati ottenuti tra le miscele contenenti il RAP con additivo e le miscele di riferimento senza fresato per osservare le differenze di prestazioni dei bitumi e conglomerati bituminosi.

5.1 Proprietà di base dei materiali costituenti

I principali materiali costituenti, come già indicato nel capitolo precedente, sono i bitumi, gli aggregati lapidei e il fresato riciclato.

Il bitume vergine 70/100 è stato testato mediante prova di penetrazione e rammollimento, come descritto nel paragrafo §4.1.5.5, riportando i seguenti risultati nella *tabella 5.1*.

I valori ottenuti rientrano nel range definito dalla scheda tecnica del bitume utilizzato. Difatti, il valore medio di penetrazione pari a 91 dmm è all'interno dell'intervallo 70-100 dmm e il risultato medio della prova di rammollimento è pari a 46,1°C che rientra nell'intervallo 43-51°C.

| | | Pen, dmm |
|--------|------|----------|
| Rep.1 | >>>> | 81 |
| Rep.2 | >>>> | 88 |
| Rep.3 | >>>> | 88 |
| Rep.4 | >>>> | 103 |
| Rep.5 | >>>> | 103 |
| Rep.6 | >>>> | 90 |
| Rep.7 | >>>> | 91 |
| Rep.8 | >>>> | 84 |
| Rep.9 | >>>> | 99 |
| Rep.10 | >>>> | 79 |
| Rep.11 | >>>> | 98 |
| Rep.12 | >>>> | 93 |

| Pen, dmm |
|----------|
| 91 |

| | | T ramm, °C | T ramm, °C |
|-------|------|------------|-------------|
| Rep.1 | >>>> | 45,7 | 46,1 |
| Rep.2 | >>>> | 46,3 | |
| Rep.3 | >>>> | 46,3 | |

Tabella 5.1: Risultati prova di penetrazione e prova di rammollimento.

Gli aggregati calcarei divisi in cumuli di dimensioni differenti e il fresato sono stati setacciati per ottenere la granulometria totale degli inerti. Il processo è stato eseguito due volte per ogni materiale. In particolare, per gli aggregati calcarei di dimensioni inferiori a 4 mm è stata eseguita una setacciatura a materiale umido (*wet*) e per gli aggregati calcarei di dimensioni superiori a 4 mm un procedimento a grani asciutti (*dry*).

I risultati ottenuti, osservabili nelle *tabelle* 5.2, hanno confermato le dimensioni delle frazioni granulometriche ottenute in impianto. Il fresato (RAP) è stato suddiviso in due frazioni differenti:

- *Black*, inerte contenente il bitume invecchiato ottenuto in seguito al processo di fresatura della pavimentazione stradale;
- *White*, fresato ottenuto dal processo di riciclo della pavimentazione stradale che ha subito un'eliminazione del bitume mediante muffola.

I valori ottenuti per entrambi i RAP evidenziano una dimensione dei grani tra 0 e 12 mm.

| L <0.063 | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Wet | | | Wet | | | Wet |
| 184,6 | | | 184,2 | | | - |
| Tratt | Pass | P% | Tratt | Pass | P% | P% |
| P tot, g | | | | | | |
| P12.5, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P10, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P8, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P6.3, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P4, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P2, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P1, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P0.5, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P0.25, g | 0,0 | 184,6 | 100% | 0,0 | 184,2 | 100% |
| P0.125, g | 1,6 | 183,0 | 99% | 1,8 | 182,4 | 99% |
| P0.063, g | 10,1 | 172,9 | 94% | 9,7 | 172,7 | 94% |
| P fondo, g | 172,9 | - | - | 172,7 | - | - |

| L 0/4 | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Wet | | | Wet | | | Wet |
| 852,9 | | | 871,7 | | | - |
| Tratt | Pass | P% | Tratt | Pass | P% | P% |
| P tot, g | | | | | | |
| P12.5, g | 0,0 | 852,9 | 100% | 0,0 | 871,7 | 100% |
| P10, g | 0,0 | 852,9 | 100% | 0,0 | 871,7 | 100% |
| P8, g | 0,0 | 852,9 | 100% | 0,0 | 871,7 | 100% |
| P6.3, g | 0,0 | 852,9 | 100% | 0,0 | 871,7 | 100% |
| P4, g | 3,0 | 849,9 | 100% | 3,3 | 868,4 | 100% |
| P2, g | 272,0 | 577,9 | 68% | 289,2 | 579,2 | 66% |
| P1, g | 239,3 | 338,6 | 40% | 252,9 | 326,3 | 37% |
| P0.5, g | 147,9 | 190,7 | 22% | 150,2 | 176,1 | 20% |
| P0.25, g | 91,4 | 99,3 | 12% | 92,8 | 83,3 | 10% |
| P0.125, g | 47,8 | 51,5 | 6% | 46,5 | 36,8 | 4% |
| P0.063, g | 43,9 | 7,6 | 1% | 36,5 | 0,3 | 0% |
| P fondo, g | 7,6 | - | - | 0,3 | - | - |

| L 4/8 | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Dry | | | Dry | | | Dry |
| 860,8 | | | 860,2 | | | - |
| Tratt | Pass | P% | Tratt | Pass | P% | P% |
| P tot, g | | | | | | |
| P12.5, g | 0,0 | 860,8 | 100% | 0,0 | 860,2 | 100% |
| P10, g | 0,0 | 860,8 | 100% | 0,0 | 860,2 | 100% |
| P8, g | 26,0 | 834,8 | 97% | 40,3 | 819,9 | 95% |
| P6.3, g | 249,1 | 585,7 | 68% | 265,5 | 554,4 | 64% |
| P4, g | 539,4 | 46,3 | 5% | 518,4 | 36,0 | 4% |
| P2, g | 42,8 | 3,5 | 0% | 34,6 | 1,4 | 0% |
| P1, g | 1,4 | 2,1 | 0% | 0,6 | 0,8 | 0% |
| P0.5, g | 0,4 | 1,7 | 0% | 0,0 | 0,8 | 0% |
| P0.25, g | 0,2 | 1,5 | 0% | 0,0 | 0,8 | 0% |
| P0.125, g | 0,0 | 1,5 | 0% | 0,0 | 0,8 | 0% |
| P0.063, g | 0,3 | 1,2 | 0% | 0,1 | 0,7 | 0% |
| P fondo, g | 1,2 | - | - | 0,7 | - | - |

| L 8/14 | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------------|
| Dry | | | Dry | | | Dry | |
| 877,8 | | | 878,5 | | | - | |
| Tratt | Pass | P% | Tratt | Pass | P% | P% | |
| P tot, g | | | | | | | |
| P12.5, g | 61,0 | 816,8 | 93% | 34,4 | 844,1 | 96% | 95% |
| P10, g | 271,9 | 544,9 | 62% | 305,1 | 539,0 | 61% | 62% |
| P8, g | 390,3 | 154,6 | 18% | 377,1 | 161,9 | 18% | 18% |
| P6.3, g | 145,7 | 8,9 | 1% | 138,4 | 23,5 | 3% | 2% |
| P4, g | 8,7 | 0,2 | 0% | 20,4 | 3,1 | 0% | 0% |
| P2, g | 0,2 | 0,0 | 0% | 2,0 | 1,1 | 0% | 0% |
| P1, g | 0,0 | 0,0 | 0% | 0,0 | 1,1 | 0% | 0% |
| P0.5, g | 0,0 | 0,0 | 0% | 0,0 | 1,1 | 0% | 0% |
| P0.25, g | 0,0 | 0,0 | 0% | 0,0 | 1,1 | 0% | 0% |
| P0.125, g | 0,0 | 0,0 | 0% | 0,0 | 1,1 | 0% | 0% |
| P0.063, g | 0,0 | 0,0 | 0% | 0,0 | 1,1 | 0% | 0% |
| P fondo, g | 0,0 | - | - | 1,1 | - | - | |

| RAP 0/12 - Black | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
| Dry | | | Dry | | | Dry | |
| 957,2 | | | 914,4 | | | - | |
| Tratt | Pass | P% | Tratt | Pass | P% | P% | |
| P tot, g | | | | | | | |
| P12.5, g | 0,0 | 957,2 | 100% | 0,0 | 914,4 | 100% | 100% |
| P10, g | 75,8 | 881,4 | 92% | 61,4 | 853,0 | 93% | 93% |
| P8, g | 137,8 | 743,6 | 78% | 138,5 | 714,5 | 78% | 78% |
| P6.3, g | 132,5 | 611,1 | 64% | 122,4 | 592,1 | 65% | 64% |
| P4, g | 214,5 | 396,6 | 41% | 175,9 | 416,2 | 46% | 43% |
| P2, g | 184,8 | 211,8 | 22% | 167,1 | 249,1 | 27% | 25% |
| P1, g | 118,2 | 93,6 | 10% | 139,9 | 109,2 | 12% | 11% |
| P0.5, g | 58,0 | 35,6 | 4% | 67,8 | 41,4 | 5% | 4% |
| P0.25, g | 24,2 | 11,4 | 1% | 29,3 | 12,1 | 1% | 1% |
| P0.125, g | 6,7 | 4,7 | 0% | 7,6 | 4,5 | 0% | 0% |
| P0.063, g | 1,5 | 3,2 | 0% | 1,3 | 3,2 | 0% | 0% |
| P fondo, g | 3,2 | - | - | 3,2 | - | - | |

| RAP - White | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------------|
| Dry | | | Dry | | | Dry | |
| 891,3 | | | 431,4 | | | - | |
| Tratt | Pass | P% | Tratt | Pass | P% | P% | |
| P tot, g | | | | | | | |
| P12.5, g | 3,0 | 888,3 | 100% | 0,0 | 431,4 | 100% | 100% |
| P10, g | 35,8 | 852,5 | 96% | 10,1 | 421,3 | 98% | 97% |
| P8, g | 114,2 | 738,3 | 83% | 64,4 | 356,9 | 83% | 83% |
| P6.3, g | 109,6 | 628,7 | 71% | 58,4 | 298,5 | 69% | 70% |
| P4, g | 145,3 | 483,4 | 54% | 87,2 | 211,3 | 49% | 52% |
| P2, g | 154,3 | 329,1 | 37% | 80,1 | 131,2 | 30% | 34% |
| P1, g | 106,5 | 222,6 | 25% | 55,3 | 75,9 | 18% | 21% |
| P0.5, g | 64,2 | 158,4 | 18% | 27,5 | 48,4 | 11% | 14% |
| P0.25, g | 45,5 | 112,9 | 13% | 17,6 | 30,8 | 7% | 10% |
| P0.125, g | 36,6 | 76,3 | 9% | 12,7 | 18,1 | 4% | 6% |
| P0.063, g | 23,0 | 53,3 | 6% | 7,6 | 10,5 | 2% | 4% |
| P fondo, g | 53,3 | - | - | 10,5 | - | - | |

Tabella 5.2: Risultati setacciatura inerti RAP e calcarei.

Sugli aggregati lapidei di dimensioni 8/14 è stato calcolato l'indice di forma; i risultati sono riportati nella *tabella 5.3* sottostante.

I valori dell'indice di forma (SI) essendo inferiori al 15% ci permettono di inserire l'inerte nella categoria SI₁₅, che è la prima categoria disponibile per la classificazione secondo la normativa. Il risultato ottenuto evidenzia che l'aggregato non avrà complicità in fase di miscelazione con il legante.

| | | |
|-----------------|-------------------------|--------------|
| M tot, g | M non-cubical, g | SI |
| 400,8 | 8,0 | 2,00% |

Tabella 5.3: Indice di forma.

Inoltre, sugli aggregati grossolani, precedentemente setacciati e divisi in frazioni granulometriche, è stato determinato il coefficiente di appiattimento. I risultati, riportati in *tabella 5.4*, individuano valori del FI ampiamente inferiori al massimo, pari al 20%, riportato nei maggiori capitolati costruttivi.

I dati ottenuti confermano quelli dell'indice di forma (SI).

| | | | | |
|--------------|-----------------|-----------------|--------------------------|---------------|
| | | M tot, g | M pass (barre), g | FI |
| 10/14 | 6,3 >>>> | 102,2 | 7,2 | 7,05% |
| 8/10 | 5,0 >>>> | 103,2 | 8,1 | 7,85% |
| 6.3/8 | 4,0 >>>> | 105,4 | 8,5 | 8,06% |
| 5/6.3 | 3,2 >>>> | 107,1 | 11,5 | 10,74% |
| 4/5 | 2,5 >>>> | 106,8 | 9,8 | 9,18% |

Tabella 5.4: Coefficiente di appiattimento (FI).

La prova di resistenza alla frantumazione Los Angeles, eseguita sui grani 10/14 degli inerti calcarei, ha fornito un valore pari a LA₂₅. Il risultato, osservabile in *tabella 5.5*, rientra nel range 19-30% tipico delle rocce di origine calcarea ma è superiore al 20% solitamente indicato per gli aggregati utilizzati negli strati d'usura delle pavimentazioni stradali extraurbane. Essendo inferiore al 25% gli inerti possono essere utilizzati per strati fondazione, base, binder e usura urbane.

| | | | |
|------------|-----------------|-------------------------|---------------|
| | M tot, g | M tratt (1.6), g | LA |
| Rep.1 >>>> | 4999,7 | 3804,1 | 23,91% |

Tabella 5.5: Prova Los Angeles.

Il fresato riciclato RAP è stato testato mediante la prova Proctor per determinare la sua frammentazione secondo le linee guida del RILEM TC237-SIB. La prova è stata realizzata su due campioni ottenendo risultati pressoché identici, come osservabile in *tabella 5.6*.

I valori ci permettono di osservare che il fresato ha un'alta resistenza alla frammentazione quindi nella fase di miscelazione e successiva compattazione non si disgregherà in frazioni più fini andando a influenzare la miscela realizzata.

| | Num fust | M fust, g | M fust+RAP, g | M RAP, g | M pass (1.6), g | Fragmentation |
|------------|----------|-----------|---------------|----------|-----------------|---------------|
| Rep.1 >>>> | 7+9 | 5055,4 | 8883,0 | 3827,6 | 220,0 | 5,75% |
| Rep.2 >>>> | 2 | 5088,5 | 8805,0 | 3716,5 | 218,9 | 5,89% |

Tabella 5.6: Prova di Frammentazione.

La qualità degli aggregati fini (0/2) è stata valutata mediante la prova dell'equivalente in sabbia, descritta nel paragrafo §4.1.5.3. I risultati, osservabili in *tabella 5.7*, hanno evidenziato come tutto l'inerte testato si è depositato sul fondo del cilindro graduato al termine della prova.

L'aggregato è stato classificato secondo normativa nella classe SE10₆₅Declared ed è utilizzabile in tutti gli strati della pavimentazione stradale. Questi risultati sono dovuti alla possibilità che l'aggregato fine in impianto abbia subito un lavaggio eliminando le particelle argillose presenti.

| | h1 (fino), mm | h2 (sosp), mm | ES |
|------------|---------------|---------------|------|
| Rep.1 >>>> | 96 | 96 | 100% |
| Rep.2 >>>> | 108 | 108 | 100% |

Tabella 5.7: Equivalente in sabbia.

Infine, per ogni tipologia di aggregato, sono state calcolate la massa volumica apparente, effettiva e satura a superficie asciutta secondo la normativa EN 1097-6. La prova è stata ripetuta due volte ed è stata eseguita la media dei risultati per avere dei valori più precisi.

I risultati, riportati nelle *5abelle 5.8* sovrastanti, sono molto simili per ogni tipologia di inerte. La prova è stata eseguita per individuare la porosità dell'aggregato e, attraverso l'indice WA_{24} , l'assorbimento d'acqua dello stesso.

I valori ottenuti classificano tutti gli inerti nella categoria WA_{241} ; ciò indica un basso assorbimento d'acqua e una maggiore resistenza ai cicli di gelo-disgelo.

Le masse volumiche trovate, essendo molto simili tra loro, indicano che il materiale utilizzato ha un basso contenuto di pori permeabili e impermeabili e quindi l'acqua non ha funzione penetrante e distruttiva.

| L 0/4 | | | |
|----------------------------------|--------|--------|----------------|
| M1 (SSD), g | 369,0 | 218,5 | - |
| M2 (pic+camp+H2O), g | 1779,0 | 1682,5 | > - |
| M3 (pic+H2O) | 1545,5 | 1545,5 | > - |
| M4 (camp), g | 368,5 | 216,5 | > - |
| ρ_a , g/cm ³ | 2,725 | 2,718 | > 2,722 |
| ρ_{rd} , g/cm ³ | 2,715 | 2,652 | > 2,683 |
| ρ_{SSD} , g/cm ³ | 2,718 | 2,676 | > 2,697 |
| WA_{24} , % | 0,14% | 0,92% | > 0,53% |

| L 4/8 | | | |
|----------------------------------|--------|--------|----------------|
| M1 (SSD), g | 751,5 | 311,0 | - |
| M2 (pic+camp+H2O), g | 1991,5 | 1734,0 | > - |
| M3 (pic+H2O) | 1538,5 | 1545,5 | > - |
| M4 (camp), g | 745,1 | 307,5 | > - |
| ρ_a , g/cm ³ | 2,546 | 2,579 | > 2,563 |
| ρ_{rd} , g/cm ³ | 2,492 | 2,506 | > 2,499 |
| ρ_{SSD} , g/cm ³ | 2,513 | 2,534 | > 2,524 |
| WA_{24} , % | 0,86% | 1,14% | > 1,00% |

| L 8/14 | | | |
|----------------------------------|--------|--------|----------------|
| M1 (SSD), g | 333,7 | 332,0 | - |
| M2 (pic+camp+H2O), g | 1749,5 | 1749,5 | > - |
| M3 (pic+H2O) | 1538,5 | 1538,5 | > - |
| M4 (camp), g | 332,0 | 330,5 | > - |
| ρ_a , g/cm ³ | 2,739 | 2,761 | > 2,750 |
| ρ_{rd} , g/cm ³ | 2,701 | 2,726 | > 2,714 |
| ρ_{SSD} , g/cm ³ | 2,715 | 2,739 | > 2,727 |
| WA_{24} , % | 0,51% | 0,45% | > 0,48% |

| RAP - Black (> 4mm) | | | |
|----------------------------------|--------|--------|----------------|
| M1 (SSD), g | 255,0 | 264,5 | - |
| M2 (pic+camp+H2O), g | 1697,5 | 1700,0 | > - |
| M3 (pic+H2O) | 1538,5 | 1538,5 | > - |
| M4 (camp), g | 253,3 | 261,5 | > - |
| ρ_a , g/cm ³ | 2,681 | 2,610 | > 2,646 |
| ρ_{rd} , g/cm ³ | 2,634 | 2,534 | > 2,584 |
| ρ_{SSD} , g/cm ³ | 2,651 | 2,563 | > 2,607 |
| WA_{24} , % | 0,67% | 1,15% | > 0,91% |

Tabella 5.8: Masse volumiche aggregati.

5.2 Determinazione del contenuto ottimale di ringiovanente

Le varie miscele di leganti come descritto nel paragrafo §4.1.4 sono testate mediante prova DSR per determinare il quantitativo ottimale di additivo ringiovanente mediante le direttive del TC 264 RAP e per studiare il comportamento visco-elastico del bitume stesso.

Inizialmente è stato eseguito un test di Amplitude Sweep e Frequency Sweep su miscele di bitumi contenenti percentuali differenti di additivo. I risultati ottenuti, osservabili in *figura 5.1* e *figura 5.2*, permettono di determinare la miscela contenente RAP avente il quantitativo di additivo ringiovanente ottimale.

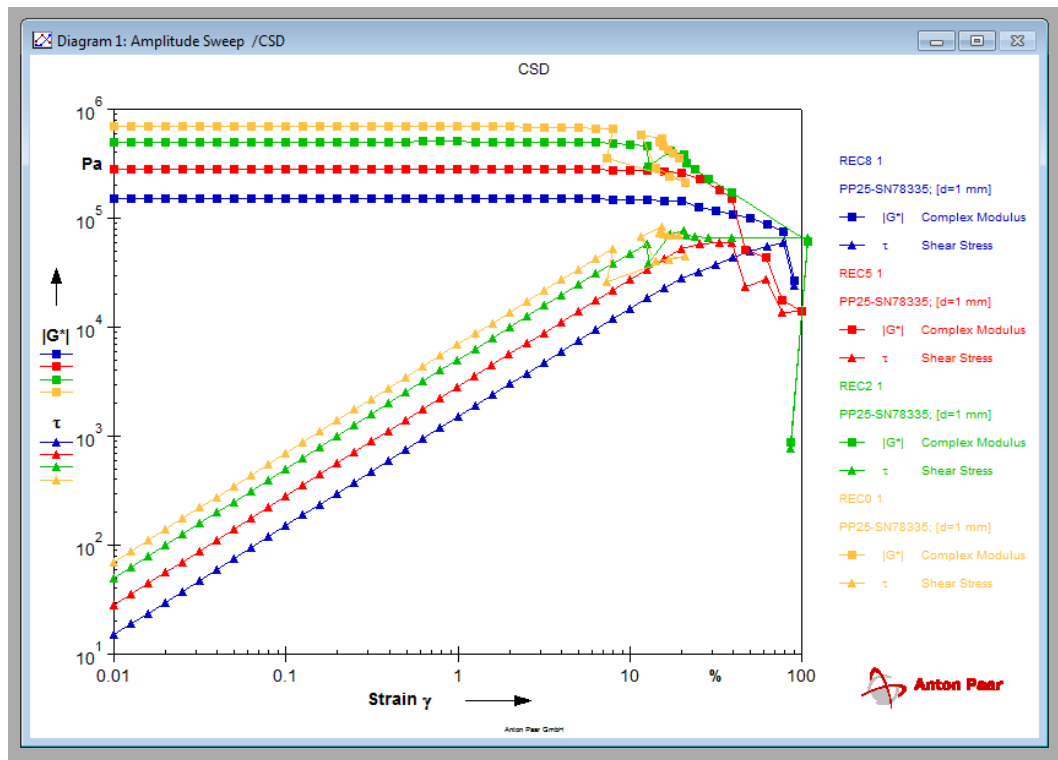


Figura 5.1: AS miscele contenenti percentuali differenti di additivo.

Le miscele testate sono le seguenti:

- REC0, miscela di bitume invecchiato estratto dal RAP;
- REC2, miscela di bitume invecchiato contenente il 2% di ringiovanente rispetto al peso del legante;

- REC5, miscela di bitume invecchiato contenente il 5% di ringiovanente rispetto al peso del legante;
- REC8, miscela di bitume invecchiato contenente l'8% di ringiovanente rispetto al peso del legante.

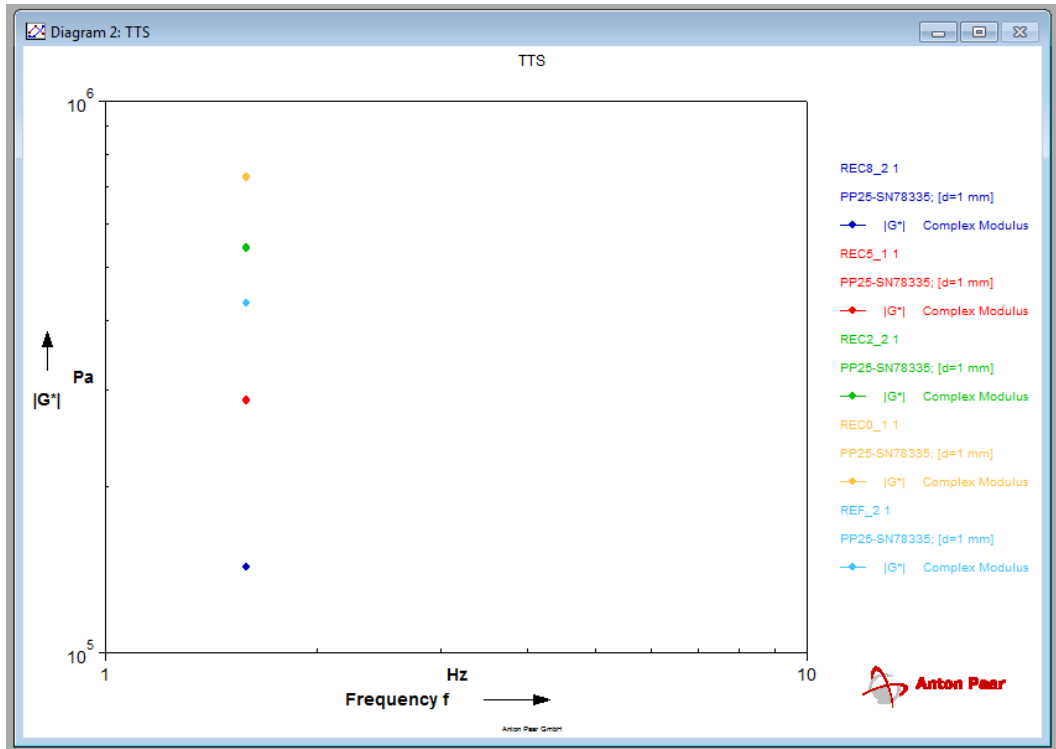


Figura 5.2: FS miscele contenenti percentuali differenti di additivo.

I valori ottenuti dalla prova FS, riassunti nella seguente *tabella 5.9*, sono stati utilizzati per determinare il quantitativo ottimale di bitume all'interno della miscela.

| REF-a | REF-b | REC0-a | REC0-b | REC2-a | REC2-b | REC2-c | REC5-a | REC5-b | REC5-c | REC8-a | REC8-b |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] |
| 4,20E+05 | 4,30E+05 | 7,27E+05 | 7,27E+05 | 6,06E+05 | 5,26E+05 | 5,40E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,32E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,20E+05 | 4,30E+05 | 7,27E+05 | 7,27E+05 | 6,06E+05 | 5,26E+05 | 5,40E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,32E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,20E+05 | 4,30E+05 | 7,28E+05 | 7,27E+05 | 6,06E+05 | 5,26E+05 | 5,41E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,32E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,30E+05 | 7,28E+05 | 7,27E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,41E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,32E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,30E+05 | 7,28E+05 | 7,28E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,41E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,32E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,30E+05 | 7,28E+05 | 7,28E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,41E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,32E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,30E+05 | 7,28E+05 | 7,28E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,41E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,33E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,30E+05 | 7,28E+05 | 7,28E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,41E+05 | 3,08E+05 | 2,86E+05 | 2,33E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,30E+05 | 7,29E+05 | 7,29E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,42E+05 | 3,09E+05 | 2,87E+05 | 2,33E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |
| 4,21E+05 | 4,31E+05 | 7,29E+05 | 7,29E+05 | 6,06E+05 | 5,27E+05 | 5,42E+05 | 3,09E+05 | 2,87E+05 | 2,33E+05 | 1,43E+05 | 1,43E+05 |

Tabella 5.9: Risultati DSR, modalità FS.

Il processo, descritto dal protocollo RILEM TC264, consiste nell'eseguire il logaritmo della media dei risultati ottenuti per ogni miscela (tabella 5.10).

| G* | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| REF | REC0 | REC2 | REC5 | REC8 |
| [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] |
| 4,25E+05 | 7,28E+05 | 5,58E+05 | 2,76E+05 | 1,43E+05 |

| log G* | | | | |
|--------|------|------|------|------|
| REF | REC0 | REC2 | REC5 | REC8 |
| [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] | [Pa] |
| 5,63 | 5,86 | 5,75 | 5,44 | 5,16 |

Tabella 5.10: Media risultati prova FS.

I valori medi, in scala logaritmica, sono poi graficati come si osserva in figura 5.3. Il punto di intersezione tra la retta dei valori medi (retta nera) e il valore ottenuto nella prova dal bitume vergine (retta rossa) permette di ottenere la percentuale ottimale di ringiovanente nel bitume invecchiato, pari a 2,9%.

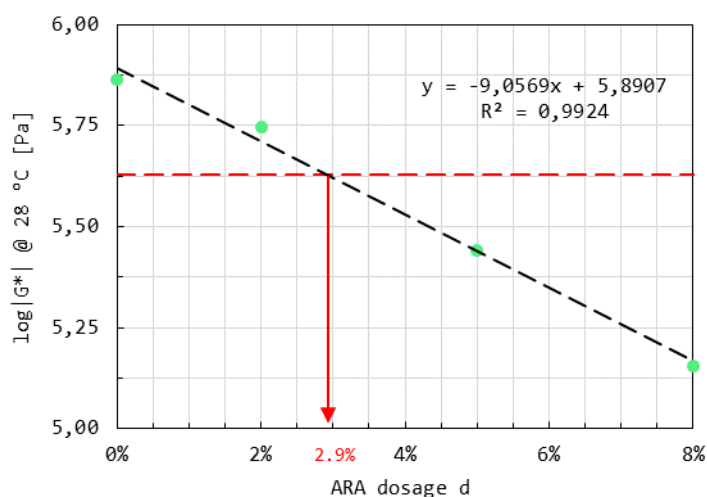


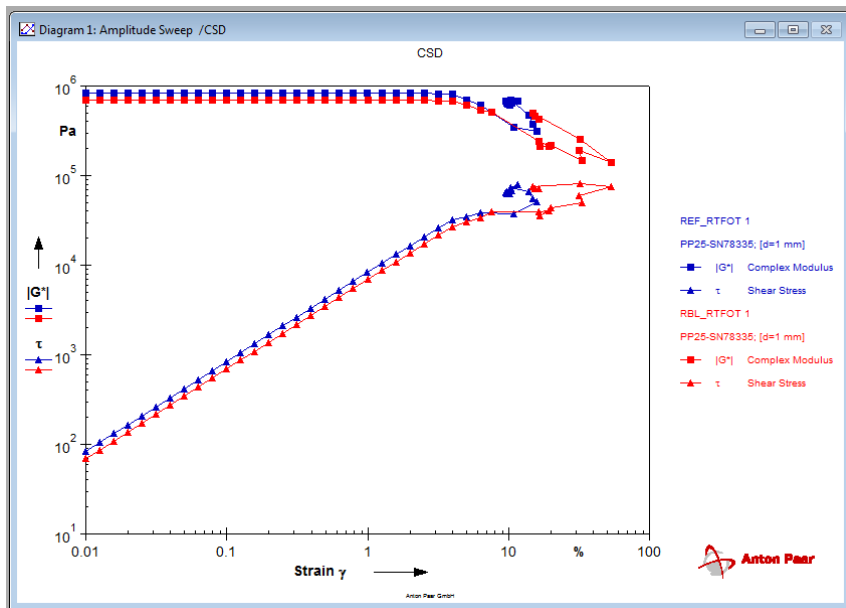
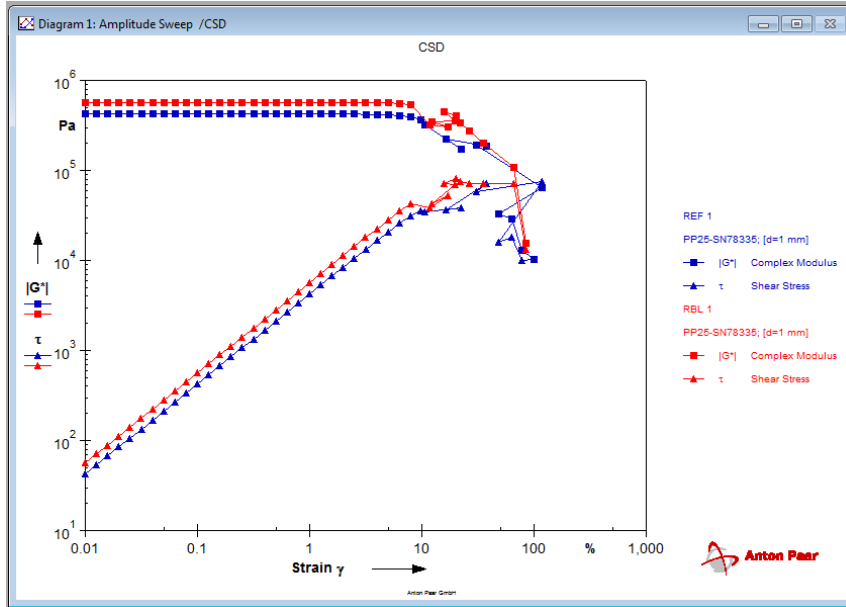
Figura 5.3: Grafico per determinare quantitativo ottimale di ringiovanente.

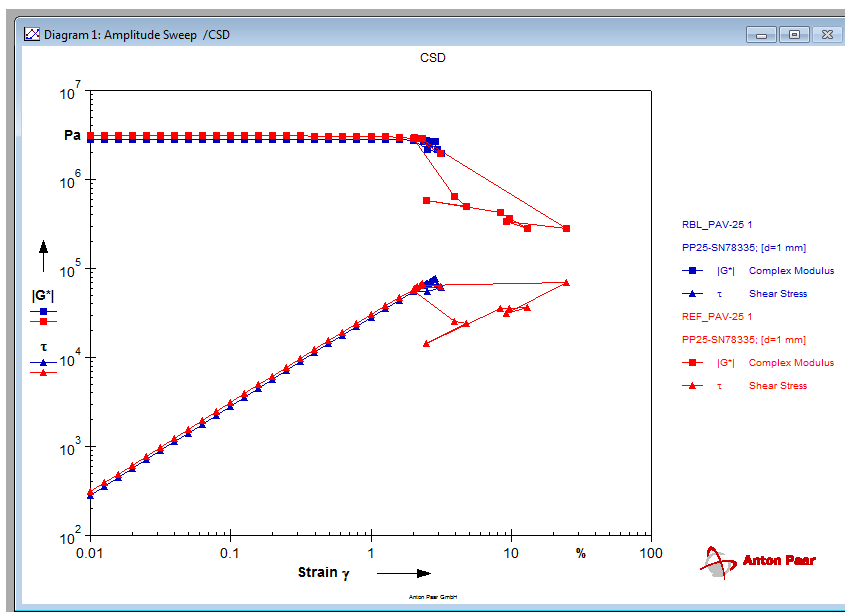
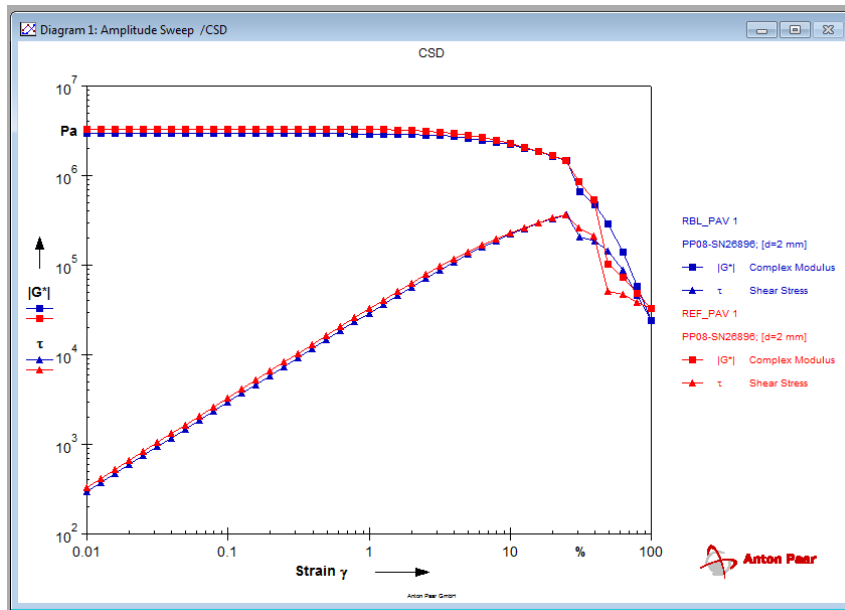
Determinato il quantitativo ottimale di ringiovanente si è proceduto a realizzare una miscela con il bitume invecchiato estratto dal RAP (RBL). Su di essa e sul bitume vergine (REF) sono state realizzate delle prove mediante il DSR in modalità Amplitude Sweep (AS). In particolare, le miscele sono state testate: senza invecchiamento, con invecchiamento mediante processo RTFOT e con invecchiamento mediante processo PAV.

Le curve ottenute dalle due miscele, come si può osservare dalla *figura 5.4*, sono sovrapponibili. Questo significa che i risultati ottenuti sono molto simili e la quantità di ringiovanente utilizzata ristabilizza le caratteristiche principale del legante.

Si può osservare come le miscele invecchiate mediante processo RTFOT o PAV presentano un valore maggiore del modulo G^* che comporta una maggiore rigidità del materiale dovuta, appunto, all'invecchiamento eseguito. Al medesimo risultato si è arrivati eseguendo la prova alla temperatura di 8°C, dove il modulo aumenta per entrambe le miscele che continuano ad avere un comportamento similare.

Nelle prove eseguite a 8 °C si osserva un andamento non costante del primo tratto per entrambi i materiali: si ritiene ciò sia dovuto alle ultime fasi di condizionamento dei campioni. Nonostante ciò, alla luce della tendenza globale delle curve, si ritengono le prove attendibili per la determinazione del limite visco-elastico lineare.





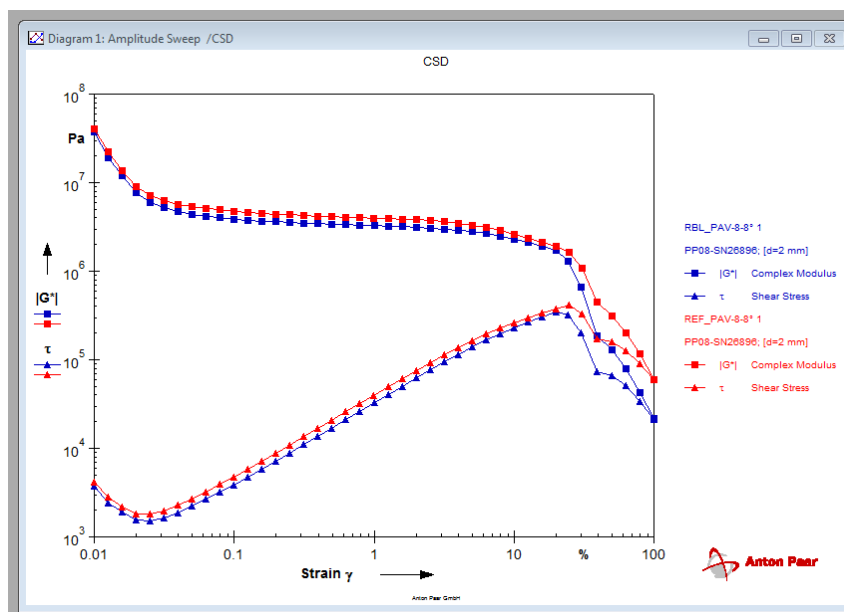


Figura 5.4: AS, miscele di leganti

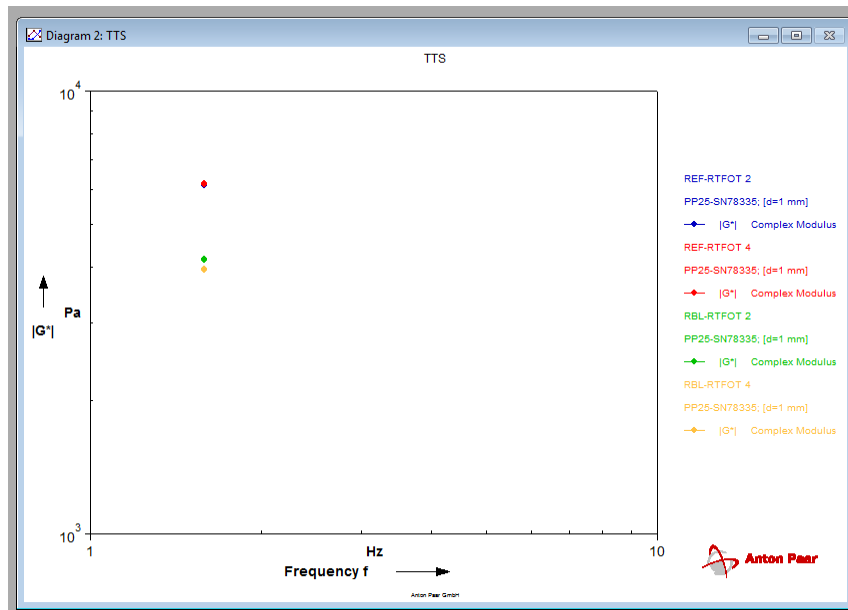
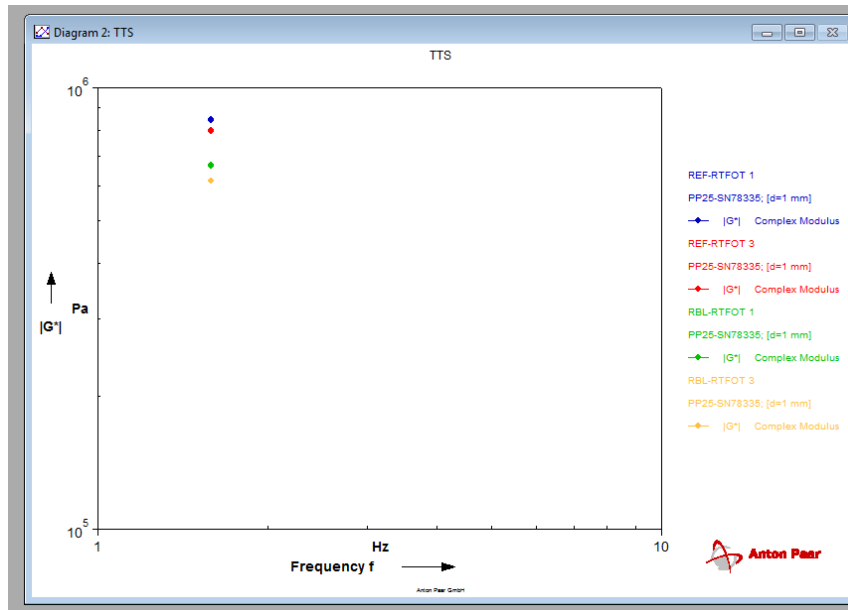
Con le medesime due miscele è stata eseguita la prova DSR in modalità Frequency Sweep (FS). Anche in questo caso le prove sono state eseguite in diversi stati di invecchiamento dei leganti. I risultati, osservabili nella *figura 5.5* e riassunti nei valori medi in *tabella 5.11*, dimostrano come la differenza tra i valori del modulo di rigidezza $|G^*|$ nel caso di miscele non invecchiate sia minima. Nel caso di miscele invecchiate con metodo RTFOT si conferma il comportamento già visualizzato nella modalità AS con un aumento del modulo di rigidezza che raddoppia rispetto alla miscela non invecchiata.

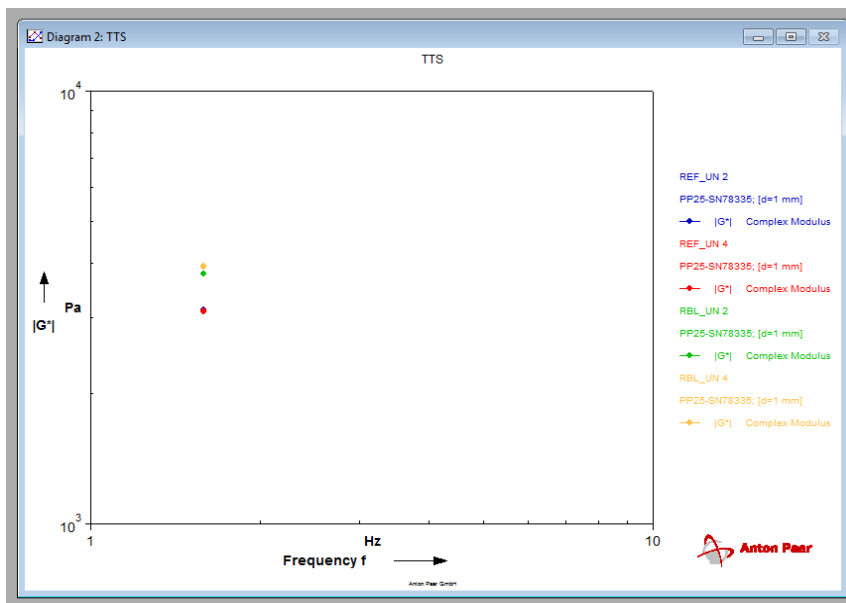
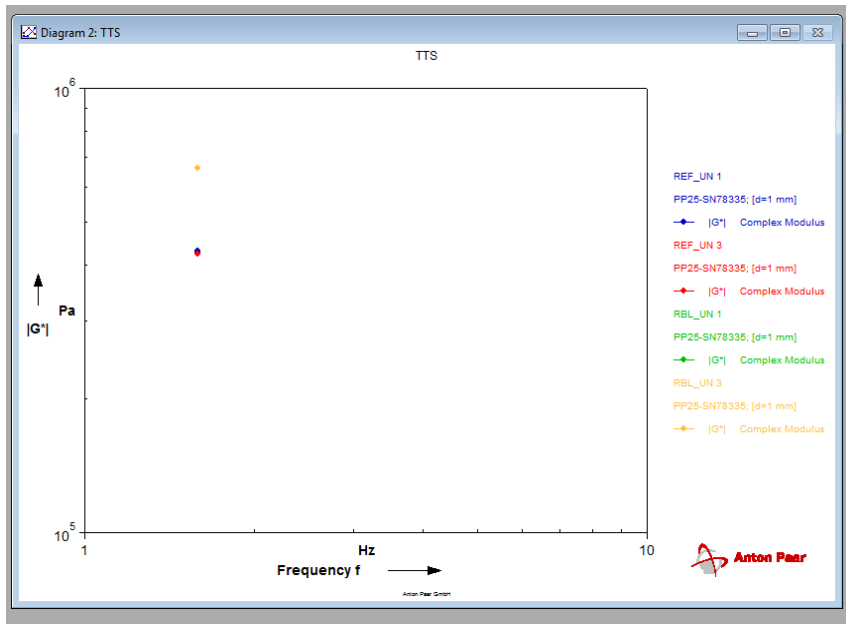
Comportamento simile si ha nell'invecchiamento mediante processo PAV con il modulo di rigidezza che aumenta ulteriormente a causa degli effetti del condizionamento eseguito.

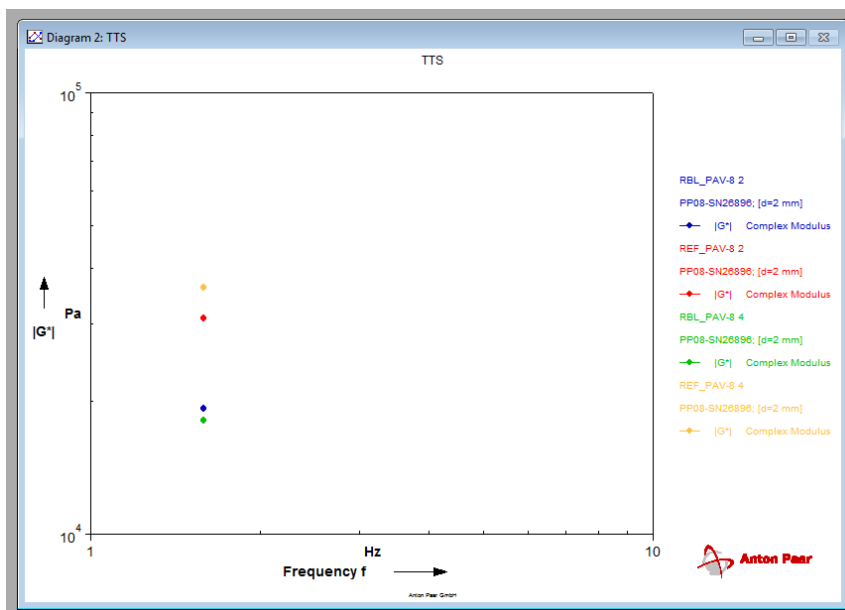
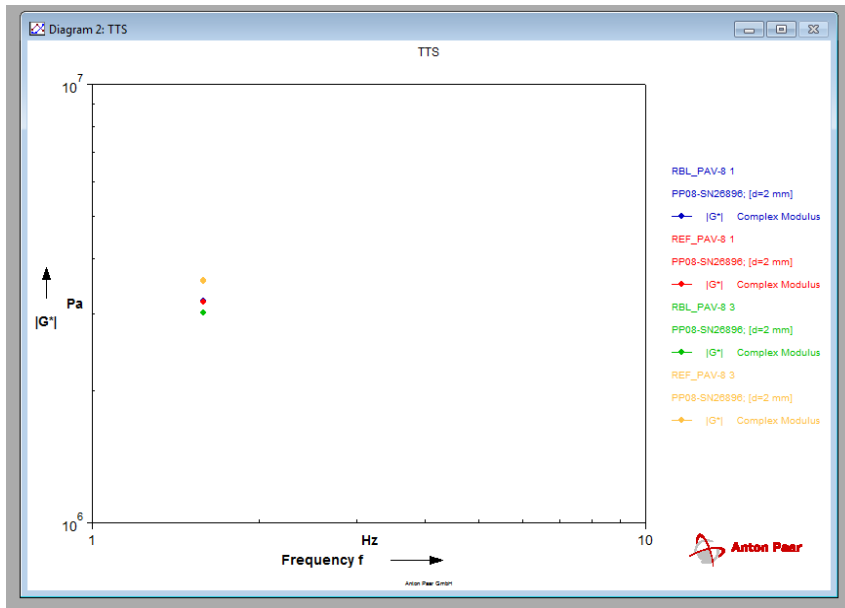
I risultati sono confermati anche nel caso di cambiamento della temperatura di prova. Aumentando quest'ultima a 58°C , rispetto ai 28°C precedenti, si ha un valore minore di $|G^*|$ dovuto all'aumento della lavorabilità del materiale. Se la temperatura viene diminuita a 8°C il materiale diminuisce la sua lavorabilità con un aumento della rigidezza.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con le linee guida definite dal RILEM TC264. Tutti i valori, come si osserva nella *tabella 5.11*, rientrano nel criterio di

accettabilità definito. Difatti, il valore della miscela contenente il quantitativo ottimale di bitume, per ogni stato di invecchiamento, deve essere maggiore al 75% del valore della miscela di riferimento nel caso di temperatura di prova pari a 28°C e 58°C. Nel caso di temperature pari a 8°C il valore della miscela con l'additivo deve essere superiore al 125%.







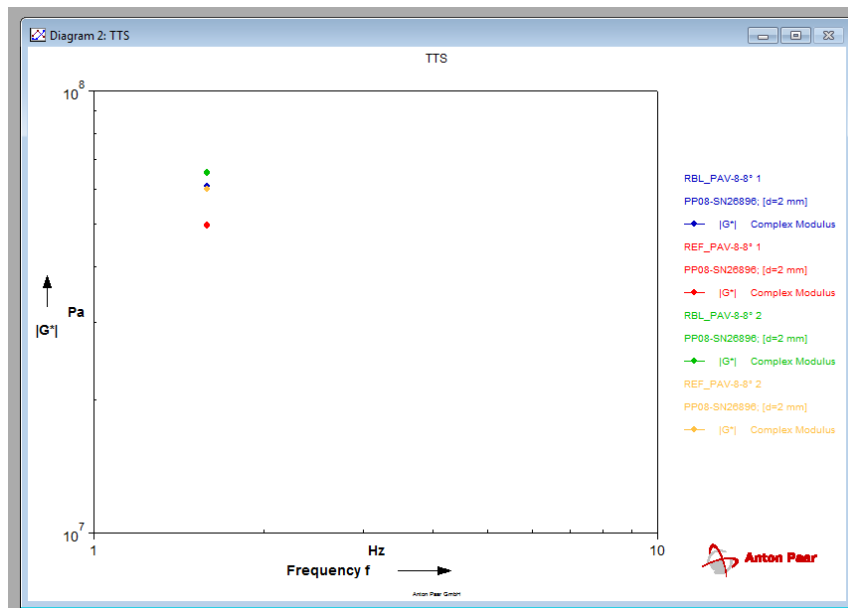
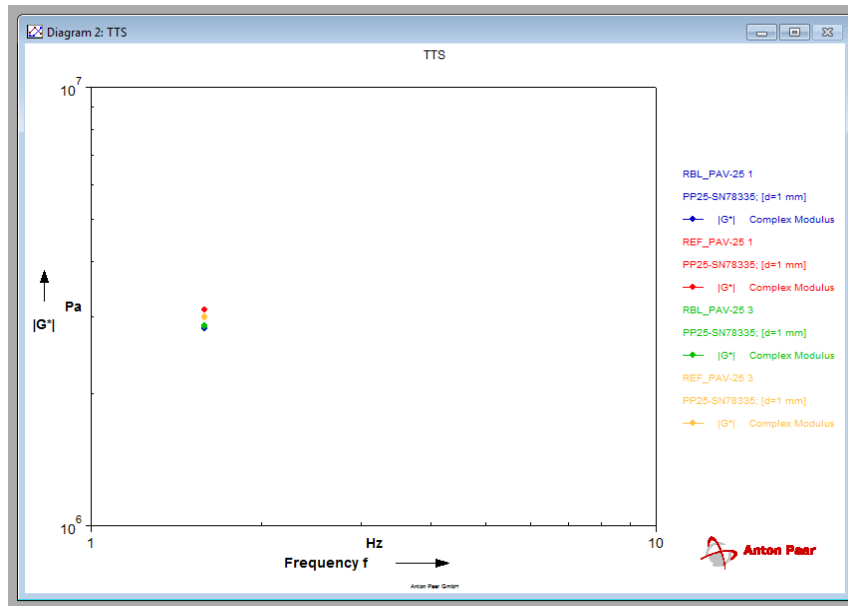


Figura 5.5: FS, miscele di leganti

| (Pa) | Aging state | OAD (Pa) | Reference binder RB | Acceptance value | Passed |
|------------------------------------|-------------|----------|---------------------|-----------------------------------|--------|
| $ G^* @ 28\text{ }^\circ\text{C}$ | unaged | 4,91E+05 | 4,26E+05 | $\geq (100\%-f) \cdot G^* _{RB}$ | Yes |
| $ G^* @ 28\text{ }^\circ\text{C}$ | RTFOT | 7,53E+05 | 8,21E+05 | | Yes |
| $ G^* @ 58\text{ }^\circ\text{C}$ | | 4,58E+03 | 6,11E+03 | | Yes |
| $ G^* @ 28\text{ }^\circ\text{C}$ | PAV | 2,83E+06 | 3,04E+06 | | Yes |
| $G'' @ 8\text{ }^\circ\text{C}$ | | 3,31E+07 | 2,77E+07 | $\leq (100\%+f) \cdot G''_{RB}$ | Yes |

Tabella 5.11: Media risultati prova FS.

5.3 Validazione del protocollo a livello di miscela

In questo paragrafo saranno presentati i risultati ottenuti nella composizione della miscela. In seguito, saranno riportati e commentati i risultati ottenuti sui provini di conglomerato bituminoso realizzati.

5.3.1 Mix design

Con il termine *mix design* del conglomerato bituminoso si intende il progetto della miscela che consiste nel definire la curva granulometrica degli aggregati e il contenuto di bitume.

La granulometria descrive la distribuzione dimensionale degli aggregati che compongono la miscela ed è rappresentabile mediante curva granulometrica (*figura 5.6*). Nel nostro caso studio sono state realizzate due miscele:

- Miscela 0%RAP, contenente aggregati lapidei calcarei;
- Miscela 60%RAP, contenente aggregati lapidei calcarei e fresato riciclato.

Nella *tabella 5.12* sono riportati i valori della percentuale passante ottenuti dopo la setacciatura delle varie frazioni granulometriche.

| | <0.063 | L 0/4 | L 4/8 | L 8/14 | RAP |
|---------------|--------|-------|-------|--------|------|
| | P% | | | | |
| P12.5 | 100% | 100% | 100% | 95% | 100% |
| P10 | 100% | 100% | 100% | 62% | 97% |
| P8 | 100% | 100% | 96% | 18% | 83% |
| P6.3 | 100% | 100% | 66% | 2% | 70% |
| P4 | 100% | 100% | 5% | 0% | 52% |
| P2 | 100% | 67% | 0% | 0% | 34% |
| P1 | 100% | 39% | 0% | 0% | 21% |
| P0.5 | 100% | 21% | 0% | 0% | 14% |
| P0.25 | 100% | 11% | 0% | 0% | 10% |
| P0.125 | 99% | 5% | 0% | 0% | 6% |
| P0.063 | 94% | 0% | 0% | 0% | 4% |

Tabella 5.12: Percentuale passante aggregati.

Per la realizzazione delle miscele ci si è basati sui fusi granulometrici definiti dal Capitolato della Provincia di Bolzano sulle costruzioni di opere viarie. I fusi in

questione hanno definito una percentuale passante massima e minima e sono osservabili in *tabella 5.13* e riportati nel grafico (*figura 5.6*) mediante le due spezzate discontinue esterne (strato di usura con bitume non modificato).

| | Min | Max |
|--------------|------|------|
| | P% | P% |
| P12.5 | 100% | 100% |
| P10 | 90% | 100% |
| P8 | 72% | 84% |
| P6.3 | 44% | 55% |
| P4 | 26% | 36% |
| P2 | 14% | 20% |
| P1 | 10% | 15% |
| P0.5 | 6% | 10% |

Tabella 5.13: Valore massimo e minimo fusi capitolato.

Nella miscela 60%RAP si è imposta una percentuale di fresato all'interno pari al 60% del peso totale e una distribuzione delle altre frazioni osservabile in *tabella 5.14*. Per la miscela senza il fresato si è individuata la distribuzione in peso per ogni frazione granulometrica riassunta in *tabella 5.15*.

% RAP in miscela:

| | | | |
|--------|---|------------|------|
| <0.063 | > | 6% | 100% |
| L 0/4 | > | 10% | |
| L 4/8 | > | 12% | |
| L 8/14 | > | 12% | |
| RAP | > | 60% | |

Tabella 5.14: Percentuale di peso aggregati nella miscela contenente fresato.

% RAP in miscela:

| | | | |
|--------|---|------------|------|
| <0.063 | > | 8% | 100% |
| L 0/4 | > | 36% | |
| L 4/8 | > | 32% | |
| L 8/14 | > | 24% | |
| RAP | > | 0% | |

Tabella 5.15: Percentuale di peso aggregati calcarei.

La percentuale passante di aggregati per le miscele viene realizzata mediante procedimento *trial and error* ottenendo per ogni frazione i valori riportati nella *tabella 5.16*.

| 0% RAP | 60% RAP |
|-----------|------------|
| P% | P% |
| 99% | 99% |
| 91% | 93% |
| 79% | 79% |
| 66% | 66% |
| 45% | 48% |
| 32% | 33% |
| 22% | 23% |
| 16% | 17% |
| 12% | 13% |
| 10% | 10% |
| 8% | 8% |

Tabella 5.16: Percentuale passante finale.

Come si può osservare dalla figura 5.6 le curve definite dalle due miscele rientrano in quelle definite dai fusi, ciò significa che sono state dimensionate correttamente.

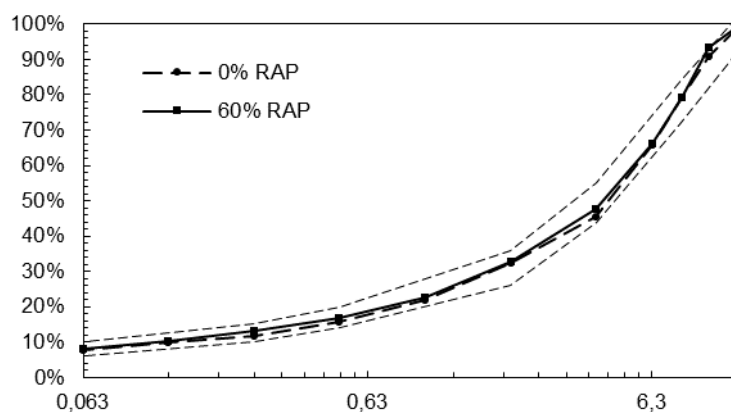


Figura 5.6: Curva granulometrica.

Il contenuto di bitume è stato selezionato sulla base di quanto indicato dal Capitolato già citato, che suggerisce un intervallo di dosaggio ottimale compreso tra il 4.6% e il 6.2% (rispetto al peso degli aggregati). La scelta è ricaduta nel valore medio dell'intervallo, ovvero nel 5.6% (che corrisponde al 5.3% rispetto al peso totale della miscela). Nel caso di miscele contenenti fresato, si è considerata la presenza del bitume invecchiato contenuto nel RAP. Mediante, la prova di ignizione si sono ottenuti valori di contenuto di bitume sul RAP variabili tra il 4.66% e il 4.85% rispetto al peso della miscela (che, ai fini di calcolo, sono stati

assimilati al valore medio pari a 4.76%). Noto tale valore, è stato possibile calcolare per differenza l'effettiva quantità di bitume vergine da introdurre nella miscela al fine di raggiungere il dosaggio obiettivo finale selezionato tramite il Capitolato.

Il dosaggio di ringiovanente è stato impostato sulla base di quanto desunto dalle precedenti fasi sperimentali eseguite a scala di legante (quantità ottimale di ringiovanente identificata).

5.3.2 Lavorabilità

Definito il mix design si sono eseguiti mediante miscelazione e compattazione i provini di conglomerato bituminoso da testare successivamente mediante le prove di rigidità e resistenza.

Le miscele, come descritto nel paragrafo §4.3.1, sono di 4 tipologie differenti:

- BASE;
- ROPT;
- ROPT+30;
- ROPT-30.

Per ogni materiale sono stati realizzati campioni cilindrici mediante pressa giratoria e lastre attraverso compattatore a rullo.

Essendo note le dimensioni del provino da realizzare, le densità dei materiali utilizzati (bitume dalle schede tecniche e aggregati dalle prove eseguite in precedenza) e impostando la percentuale di vuoti al 5% dopo 100 giri della pressa giratoria, è stato possibile calcolare la quantità di miscela da inserire in ogni fustella eseguendo la formula inversa ($\text{Massa} = \text{Densità} \times \text{Volume}$). I valori delle densità sono stati riassunti in *tabella 5.17*.

| | h, mm | M tot, g | ← | Filler | L 0/4 | L 4/8 | L 8/14 | RAP 0/12 | Bitume | Ring |
|---------|-------|-------------|---|--------|-------|-------|--------|----------|--------|------|
| 0% RAP | 60 | 2570 | | 195 | 876 | 779 | 584 | | 136 | |
| 60% RAP | 60 | 2543 | | 149 | 248 | 297 | 297 | 1486 | 64 | 3,53 |

| | pagg tot, g/cm ³ | pbit, g/cm ³ | ← | pmax, g/cm ³ | → | Vuoti | → | pbulk, g/cm ³ |
|---------|-----------------------------|-------------------------|---|-------------------------|---|-------|---|--------------------------|
| 0% RAP | 2,64 | 1,01 | | 2,551 | | 5,00% | | 2,424 |
| 60% RAP | 2,61 | 1,01 | | 2,525 | | 5,00% | | 2,399 |

Tabella 5.17: Densità aggregati, bitume e provino.

Nelle *tabelle 5.18* sono riportate le distribuzioni in grammi delle masse delle varie frazioni granulometriche e la massa totale del conglomerato da inserire nella fustella. La prima tabella fa riferimento a provini di diametro pari a 150 mm, la seconda a campioni di diametro 100 mm e la terza alle lastre di dimensione 300x400 mm.

| | h, mm | M tot, g | ← | Filler | L 0/4 | L 4/8 | L 8/14 | RAP 0/12 | Bitume | Ring |
|---------|-------|-------------|---|--------|-------|-------|--------|----------|--------|------|
| 0% RAP | 80 | 1523 | | 115 | 519 | 461 | 346 | | 81 | |
| 60% RAP | 80 | 1507 | | 88 | 147 | 176 | 176 | 881 | 38 | 2,09 |

| | | M tot, g | ← | Filler | L 0/4 | L 4/8 | L 8/14 | RAP 0/12 | Bitume | Ring |
|---------|--------|--------------|---|--------|-------|-------|--------|----------|--------|-------|
| 0% RAP | Lastra | 11634 | | 881 | 3966 | 3525 | 2644 | | 617 | |
| 60% RAP | Lastra | 11514 | | 673 | 1122 | 1346 | 1346 | 6729 | 291 | 16,00 |

Tabella 5.18: Masse totali provini cilindrici.

Per la realizzazione delle quattro tipologie di conglomerato bituminoso sarà variato il quantitativo di additivo ringiovanente presente all'interno del bitume utilizzato nella miscela.

Mediante la pressa a taglio giratoria è possibile visualizzare la variazione dell'altezza del provino e la percentuale dei vuoti ad ogni ciclo. I valori ottenuti sono osservabili in *tabella 5.19* e sono divisi per ogni miscela realizzata per i provini di diametro 100 mm.

Come si può osservare dai dati il valore dei vuoti diminuisce ogni ciclo della pressa e si assesta intorno al 5-6% per le miscela BASE e ROPT+30. Risultati

differenti si visualizzano per le miscele ROPT in cui si ottengono valori molto diversi tra i provini da 1 a 4 e da 4 a 8, con i dati dei vuoti che variano nei primi attorno al 5% e nei secondi oscillando attorno al 2%.

Nel caso dei provini di ROPT-30 si hanno valori non costanti con dati dei vuoti che oscillano attorno al 3%.

Questi risultati fanno dedurre che le miscele contenenti il ringiovanente sono più dense ed hanno un ridotto numero di vuoti, probabilmente dovuto all'effetto dell'additivo sul bitume che lo rende maggiormente fluido. Ma un utilizzo di un ringiovanente più elevato rispetto contenuto ottimale causa un aumento del numero di vuoti e risultati simili alla miscela BASE che non contiene il freato riciclato.

| d_{max} , g/cm ³ : | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | BASE-1 | | BASE-2 | | BASE-3 | | BASE-4 | | BASE-5 | | BASE-6 | | BASE-7 | | BASE-8 | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------|--------|--------|
| | P, g | 1518,9 | P, g | 1518,7 | P, g | 1518,7 | P, g | 1522,6 | P, g | 1528,0 | P, g | 1516,7 | P, g 1508,8 | | P, g | 1521,5 |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 93,5 | 18,9% | 96,0 | 21,1% | 94,3 | 19,7% | 94,1 | 19,3% | 94,1 | 19,0% | 93,6 | 19,2% | 91,1 | 17,3% | 92,9 | 18,3% |
| 5 | 92,6 | 18,2% | 95,0 | 20,2% | 93,3 | 18,8% | 93,0 | 18,3% | 93,0 | 18,0% | 92,6 | 18,3% | 90,2 | 16,5% | 91,9 | 17,4% |
| 6 | 91,8 | 17,4% | 94,1 | 19,5% | 92,5 | 18,1% | 92,2 | 17,6% | 92,2 | 17,3% | 91,7 | 17,5% | 89,4 | 15,7% | 91,1 | 16,7% |
| 8 | 90,6 | 16,3% | 92,7 | 18,2% | 91,2 | 16,9% | 90,9 | 16,4% | 90,9 | 16,1% | 90,4 | 16,3% | 88,1 | 14,5% | 89,8 | 15,4% |
| 10 | 89,6 | 15,4% | 91,7 | 17,4% | 90,2 | 16,0% | 89,9 | 15,5% | 89,9 | 15,2% | 89,4 | 15,4% | 87,0 | 13,4% | 88,7 | 14,4% |
| 12 | 88,8 | 14,7% | 90,8 | 16,5% | 89,4 | 15,3% | 89,1 | 14,7% | 89,1 | 14,4% | 88,5 | 14,5% | 86,2 | 12,6% | 87,9 | 13,6% |
| 16 | 87,6 | 13,5% | 89,5 | 15,3% | 88,1 | 14,0% | 87,8 | 13,5% | 87,8 | 13,2% | 87,2 | 13,2% | 85,0 | 11,4% | 86,7 | 12,4% |
| 20 | 86,7 | 12,6% | 88,5 | 14,4% | 87,2 | 13,1% | 86,8 | 12,5% | 86,8 | 12,2% | 86,1 | 12,1% | 84,0 | 10,3% | 85,7 | 11,4% |
| 25 | 85,9 | 11,8% | 87,5 | 13,4% | 86,3 | 12,2% | 85,9 | 11,6% | 85,9 | 11,3% | 85,1 | 11,1% | 83,1 | 9,3% | 84,7 | 10,4% |
| 32 | 84,9 | 10,7% | 86,4 | 12,3% | 85,3 | 11,2% | 85,0 | 10,6% | 85,0 | 10,3% | 84,0 | 9,9% | 82,1 | 8,2% | 83,7 | 9,3% |
| 40 | 84,1 | 9,9% | 85,5 | 11,4% | 84,5 | 10,4% | 84,1 | 9,7% | 84,1 | 9,4% | 83,0 | 8,8% | 81,2 | 7,2% | 82,9 | 8,4% |
| 50 | 83,3 | 9,0% | 84,6 | 10,4% | 83,7 | 9,5% | 83,3 | 8,8% | 83,3 | 8,5% | 82,1 | 7,8% | 80,5 | 6,4% | 82,1 | 7,5% |
| 64 | 82,4 | 8,0% | 83,7 | 9,5% | 82,9 | 8,6% | 82,5 | 7,9% | 82,5 | 7,6% | 81,2 | 6,8% | 79,7 | 5,5% | 81,3 | 6,6% |
| 80 | 81,7 | 7,2% | 82,9 | 8,6% | 82,2 | 7,8% | 81,8 | 7,1% | 81,8 | 6,8% | 80,4 | 5,9% | 79,1 | 4,8% | 80,6 | 5,8% |
| 100 | 81,0 | 6,4% | 82,1 | 7,7% | 81,5 | 7,1% | 81,1 | 6,3% | 81,1 | 6,0% | 79,7 | 5,1% | 78,5 | 4,0% | 80,0 | 5,1% |
| k: | 3,94% | | 4,21% | | 3,98% | | 4,07% | | 4,09% | | 4,48% | | 4,26% | | 4,20% | |

| | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{max}, g/cm³: | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | ROPT-30-1 | | ROPT-30-2 | | ROPT-30-3 | | ROPT-30-4 | | ROPT-30-5 | | ROPT-30-6 | | ROPT-30-7 | | ROPT-30-8 | |
|-----------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | P, g 1506,6 | | P, g 1488,5 | | P, g 1496,4 | | P, g 1495,3 | | P, g 1502,9 | | P, g 1498,9 | | P, g 1506,8 | | P, g 1498,0 | |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 90,1 | 15,7% | 89,6 | 16,2% | 89,3 | 15,5% | 89,2 | 15,5% | 88,8 | 14,7% | 88,7 | 14,8% | 90,0 | 15,6% | 89,8 | 15,9% |
| 5 | 89,1 | 14,7% | 88,6 | 15,3% | 88,2 | 14,4% | 88,2 | 14,5% | 87,8 | 13,7% | 87,7 | 13,8% | 88,9 | 14,5% | 88,8 | 15,0% |
| 6 | 88,3 | 14,0% | 87,8 | 14,5% | 87,4 | 13,6% | 87,4 | 13,7% | 87,1 | 13,0% | 86,9 | 13,0% | 88,0 | 13,7% | 88,0 | 14,2% |
| 8 | 87,0 | 12,7% | 86,5 | 13,2% | 86,1 | 12,3% | 86,0 | 12,3% | 85,8 | 11,7% | 85,7 | 11,8% | 86,7 | 12,4% | 86,7 | 12,9% |
| 10 | 86,0 | 11,7% | 85,4 | 12,1% | 85,1 | 11,3% | 85,0 | 11,3% | 84,8 | 10,7% | 84,7 | 10,8% | 85,7 | 11,4% | 85,7 | 11,9% |
| 12 | 85,2 | 10,8% | 84,6 | 11,3% | 84,3 | 10,5% | 84,2 | 10,4% | 84,1 | 9,9% | 83,9 | 9,9% | 84,9 | 10,5% | 84,9 | 11,0% |
| 16 | 84,0 | 9,6% | 83,4 | 10,0% | 83,0 | 9,1% | 82,9 | 9,0% | 82,9 | 8,6% | 82,7 | 8,6% | 83,6 | 9,1% | 83,7 | 9,8% |
| 20 | 83,0 | 8,5% | 82,5 | 9,0% | 82,1 | 8,1% | 82,0 | 8,0% | 82,0 | 7,6% | 81,9 | 7,7% | 82,7 | 8,1% | 82,8 | 8,8% |
| 25 | 82,2 | 7,6% | 81,6 | 8,0% | 81,3 | 7,2% | 81,2 | 7,1% | 81,2 | 6,7% | 81,0 | 6,7% | 81,9 | 7,2% | 81,9 | 7,8% |
| 32 | 81,3 | 6,6% | 80,7 | 7,0% | 80,4 | 6,1% | 80,4 | 6,2% | 80,3 | 5,7% | 80,2 | 5,8% | 81,1 | 6,3% | 81,1 | 6,9% |
| 40 | 80,5 | 5,6% | 80,0 | 6,1% | 79,8 | 5,4% | 79,7 | 5,4% | 79,6 | 4,8% | 79,5 | 4,9% | 80,5 | 5,6% | 80,4 | 6,1% |
| 50 | 79,9 | 4,9% | 79,3 | 5,3% | 79,2 | 4,7% | 79,2 | 4,8% | 79,1 | 4,2% | 79,0 | 4,3% | 80,0 | 5,0% | 79,8 | 5,4% |
| 64 | 79,3 | 4,2% | 78,7 | 4,6% | 78,6 | 4,0% | 78,5 | 3,9% | 78,5 | 3,5% | 78,4 | 3,6% | 79,5 | 4,4% | 79,2 | 4,6% |
| 80 | 78,8 | 3,6% | 78,2 | 4,0% | 78,2 | 3,5% | 78,1 | 3,4% | 78,0 | 2,9% | 78,0 | 3,1% | 79,1 | 4,0% | 78,7 | 4,0% |
| 100 | 78,4 | 3,1% | 77,7 | 3,4% | 77,8 | 3,0% | 77,7 | 2,9% | 77,7 | 2,5% | 77,6 | 2,6% | 78,7 | 3,5% | 78,3 | 3,6% |
| k: | 4,06% | | 4,11% | | 4,01% | | 4,02% | | 3,94% | | 3,92% | | 3,87% | | 3,97% | |

| | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{max}, g/cm³: | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | ROPT-1 | | ROPT-2 | | ROPT-3 | | ROPT-4 | | ROPT-5 | | ROPT-6 | | ROPT-7 | | ROPT-8 | |
|-----------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | P, g 1499,5 | | P, g 1501,2 | | P, g 1496,5 | | P, g 1501,4 | | P, g 1493,0 | | P, g 1498,9 | | P, g 1497,2 | | P, g 1497,8 | |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 91,1 | 17,0% | 90,9 | 16,8% | 93,0 | 18,9% | 93,4 | 18,9% | 88,4 | 14,9% | 87,4 | 13,5% | 88,1 | 14,3% | 89,0 | 15,1% |
| 5 | 90,2 | 16,2% | 89,9 | 15,8% | 91,9 | 17,9% | 92,4 | 18,0% | 87,4 | 13,9% | 86,5 | 12,6% | 87,1 | 13,3% | 88,0 | 14,2% |
| 6 | 89,4 | 15,5% | 89,1 | 15,1% | 91,0 | 17,1% | 91,4 | 17,1% | 86,6 | 13,1% | 85,7 | 11,8% | 86,3 | 12,5% | 87,1 | 13,3% |
| 8 | 88,1 | 14,2% | 87,8 | 13,8% | 89,6 | 15,8% | 90,0 | 15,8% | 85,3 | 11,8% | 84,4 | 10,4% | 85,0 | 11,2% | 85,7 | 11,9% |
| 10 | 87,2 | 13,3% | 86,8 | 12,8% | 88,5 | 14,8% | 88,9 | 14,8% | 84,3 | 10,7% | 83,4 | 9,3% | 84,0 | 10,1% | 84,6 | 10,7% |
| 12 | 86,4 | 12,5% | 86,0 | 12,0% | 87,7 | 14,0% | 88,0 | 13,9% | 83,5 | 9,9% | 82,6 | 8,4% | 83,2 | 9,3% | 83,7 | 9,8% |
| 16 | 85,2 | 11,3% | 84,8 | 10,8% | 86,4 | 12,7% | 86,7 | 12,6% | 82,2 | 8,5% | 81,4 | 7,1% | 81,9 | 7,8% | 82,5 | 8,5% |
| 20 | 84,3 | 10,3% | 83,9 | 9,8% | 85,4 | 11,7% | 85,7 | 11,6% | 81,3 | 7,4% | 80,6 | 6,2% | 81,0 | 6,8% | 81,5 | 7,3% |
| 25 | 83,5 | 9,5% | 83,0 | 8,8% | 84,5 | 10,7% | 84,8 | 10,7% | 79,8 | 5,7% | 79,8 | 5,2% | 80,2 | 5,9% | 80,6 | 6,3% |
| 32 | 82,6 | 8,5% | 82,2 | 7,9% | 83,6 | 9,8% | 83,8 | 9,6% | 79,5 | 5,3% | 79,1 | 4,4% | 79,4 | 4,9% | 79,7 | 5,2% |
| 40 | 81,9 | 7,7% | 81,5 | 7,2% | 82,7 | 8,8% | 83,0 | 8,7% | 78,7 | 4,4% | 78,5 | 3,7% | 78,8 | 4,2% | 79,0 | 4,4% |
| 50 | 81,2 | 6,9% | 80,8 | 6,4% | 82,0 | 8,0% | 82,3 | 8,0% | 78,1 | 3,7% | 78,0 | 3,0% | 78,2 | 3,5% | 78,3 | 3,6% |
| 64 | 80,5 | 6,1% | 80,2 | 5,7% | 81,3 | 7,2% | 81,5 | 7,1% | 77,4 | 2,8% | 77,5 | 2,4% | 77,6 | 2,7% | 77,6 | 2,7% |
| 80 | 79,9 | 5,4% | 79,7 | 5,1% | 80,7 | 6,5% | 80,9 | 6,4% | 76,9 | 2,2% | 77,2 | 2,0% | 77,2 | 2,2% | 77,1 | 2,1% |
| 100 | 79,5 | 4,9% | 79,2 | 4,5% | 80,2 | 6,0% | 80,4 | 5,8% | 76,5 | 1,6% | 76,9 | 1,7% | 76,8 | 1,7% | 76,7 | 1,5% |
| k: | 3,88% | | 3,92% | | 4,13% | | 4,20% | | 4,29% | | 3,84% | | 4,06% | | 4,39% | |

| | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $d_{max}, g/cm^3$: | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | ROPT+30-1 | | ROPT+30-2 | | ROPT+30-3 | | ROPT+30-4 | | ROPT+30-5 | | ROPT+30-6 | | ROPT+30-7 | | ROPT+30-8 | |
|-----|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
| | P, g 1508,1 | | P, g 1493,5 | | P, g 1493,5 | | P, g 1502,1 | | P, g 1504,6 | | P, g 1499,1 | | P, g 1541,4 | | P, g 1508,4 | |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 90,8 | 16,3% | 92,1 | 18,2% | 93,2 | 19,2% | 94,1 | 19,5% | 93,9 | 19,2% | 92,8 | 18,5% | 98,7 | 21,2% | 95,7 | 20,6% |
| 5 | 89,9 | 15,4% | 91,1 | 17,3% | 92,1 | 18,2% | 92,9 | 18,4% | 92,9 | 18,3% | 91,8 | 17,7% | 97,6 | 20,3% | 94,7 | 19,7% |
| 6 | 89,1 | 14,7% | 90,2 | 16,5% | 91,3 | 17,5% | 92,0 | 17,7% | 92,0 | 17,5% | 91,0 | 16,9% | 96,7 | 19,6% | 93,8 | 18,9% |
| 8 | 87,8 | 13,4% | 88,9 | 15,2% | 89,9 | 16,2% | 90,5 | 16,3% | 90,7 | 16,3% | 89,6 | 15,6% | 95,2 | 18,3% | 92,4 | 17,7% |
| 10 | 86,9 | 12,5% | 87,9 | 14,3% | 88,8 | 15,2% | 89,4 | 15,3% | 89,7 | 15,4% | 88,6 | 14,7% | 94,3 | 17,5% | 91,3 | 16,7% |
| 12 | 86,1 | 11,7% | 87,1 | 13,5% | 87,9 | 14,3% | 88,5 | 14,4% | 89,0 | 14,7% | 87,8 | 13,9% | 93,2 | 16,6% | 90,4 | 15,9% |
| 16 | 84,9 | 10,5% | 85,9 | 12,3% | 86,7 | 13,1% | 87,1 | 13,0% | 87,7 | 13,5% | 86,5 | 12,6% | 91,8 | 15,3% | 89,1 | 14,7% |
| 20 | 84,1 | 9,6% | 84,9 | 11,3% | 85,7 | 12,1% | 86,1 | 12,0% | 86,7 | 12,5% | 85,6 | 11,7% | 90,8 | 14,4% | 88,1 | 13,7% |
| 25 | 83,3 | 8,7% | 84,0 | 10,3% | 84,8 | 11,2% | 85,2 | 11,1% | 85,8 | 11,5% | 84,7 | 10,8% | 89,8 | 13,4% | 87,1 | 12,7% |
| 32 | 82,4 | 7,7% | 83,1 | 9,3% | 83,8 | 10,1% | 84,2 | 10,0% | 84,8 | 10,5% | 83,8 | 9,8% | 88,7 | 12,3% | 86,0 | 11,6% |
| 40 | 81,8 | 7,1% | 82,3 | 8,4% | 83,0 | 9,3% | 83,4 | 9,2% | 84,0 | 9,7% | 83,0 | 8,9% | 87,8 | 11,4% | 85,2 | 10,8% |
| 50 | 81,2 | 6,4% | 81,6 | 7,7% | 82,3 | 8,5% | 82,7 | 8,4% | 83,2 | 8,8% | 82,3 | 8,2% | 87,0 | 10,6% | 84,3 | 9,8% |
| 64 | 80,6 | 5,7% | 80,9 | 6,9% | 81,5 | 7,6% | 81,9 | 7,5% | 82,4 | 7,9% | 81,6 | 7,4% | 86,1 | 9,7% | 83,5 | 9,0% |
| 80 | 80,1 | 5,1% | 80,3 | 6,2% | 80,9 | 6,9% | 81,3 | 6,8% | 81,8 | 7,2% | 81,0 | 6,7% | 85,4 | 8,9% | 82,8 | 8,2% |
| 100 | 79,8 | 4,7% | 79,8 | 5,6% | 80,4 | 6,3% | 80,7 | 6,1% | 81,2 | 6,5% | 80,5 | 6,1% | 84,7 | 8,2% | 82,2 | 7,5% |
| k: | 3,73% | | 4,03% | | 4,11% | | 4,23% | | 4,02% | | 3,98% | | 4,14% | | 4,17% | |

Tabella 5.19: Vuoti dopo pressa a taglio giratoria (100 mm).

Nella *tabella 5.20* sono riportati i risultati dopo la compattazione mediante pressa a taglio giratoria dei provini di diametro 150 mm. I risultati ottenuti differiscono da quelli dei provini di diametro minore, difatti tutte le miscele hanno valori non costanti per le varie fustelle. La miscela BASE presenta percentuali dei vuoti pari a 8% contro valori medi di circa il 9% delle miscele contenenti il fresato.

Si deve notare che le miscele contenente l'additivo ringiovanente presentano valori che variano dal 7% al 12% quindi difficilmente è possibile descrivere un effetto preciso dell'additivo sul conglomerato per quanto riguarda i vuoti.

Va comunque precisato che tali variazioni possono essere dovute alla inevitabile variabilità operativa delle fasi di miscelazione e compattazione.

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{max}, g/cm³: | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 | 2,551 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | BASE-1 | | BASE-2 | | BASE-3 | | BASE-4 | | BASE-5 | | BASE-6 | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P, g | 2569,6 | P, g | 2562,6 | P, g | 2553,4 | P, g | 2541,3 | P, g | 2555,6 | P, g | 2558,1 |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 70,8 | 19,6% | 70,1 | 18,9% | 70,0 | 19,0% | 70,6 | 20,1% | 71,5 | 20,8% | 71,3 | 20,4% |
| 5 | 70,2 | 18,9% | 69,4 | 18,1% | 69,3 | 18,2% | 70,0 | 19,4% | 70,8 | 20,0% | 70,7 | 19,8% |
| 6 | 69,7 | 18,3% | 68,8 | 17,4% | 68,8 | 17,6% | 69,5 | 18,9% | 70,3 | 19,4% | 70,1 | 19,1% |
| 8 | 68,9 | 17,3% | 67,9 | 16,3% | 67,9 | 16,5% | 68,7 | 17,9% | 69,4 | 18,4% | 69,3 | 18,1% |
| 10 | 68,2 | 16,5% | 67,2 | 15,4% | 67,3 | 15,8% | 68,0 | 17,1% | 68,7 | 17,5% | 68,6 | 17,3% |
| 12 | 67,7 | 15,9% | 66,7 | 14,8% | 66,7 | 15,0% | 67,5 | 16,5% | 68,2 | 16,9% | 68,0 | 16,6% |
| 16 | 66,9 | 14,9% | 65,8 | 13,6% | 65,9 | 14,0% | 66,7 | 15,5% | 67,3 | 15,8% | 67,1 | 15,5% |
| 20 | 66,2 | 14,0% | 65,2 | 12,8% | 65,3 | 13,2% | 66,1 | 14,7% | 66,6 | 14,9% | 66,4 | 14,6% |
| 25 | 65,6 | 13,2% | 64,5 | 11,9% | 64,6 | 12,3% | 65,4 | 13,8% | 66,0 | 14,2% | 65,8 | 13,8% |
| 32 | 65,0 | 12,4% | 63,8 | 10,9% | 63,9 | 11,3% | 64,7 | 12,8% | 65,3 | 13,2% | 65,1 | 12,9% |
| 40 | 64,4 | 11,6% | 63,2 | 10,0% | 63,4 | 10,6% | 64,1 | 12,0% | 64,6 | 12,3% | 64,5 | 12,0% |
| 50 | 63,8 | 10,7% | 62,6 | 9,2% | 62,9 | 9,9% | 63,5 | 11,2% | 64,0 | 11,5% | 63,9 | 11,2% |
| 64 | 63,1 | 9,7% | 62,0 | 8,3% | 62,3 | 9,0% | 62,8 | 10,2% | 63,3 | 10,5% | 63,2 | 10,2% |
| 80 | 62,5 | 8,9% | 61,4 | 7,4% | 61,8 | 8,3% | 62,3 | 9,5% | 62,8 | 9,8% | 62,7 | 9,5% |
| 100 | 62,0 | 8,1% | 60,9 | 6,6% | 61,3 | 7,6% | 61,7 | 8,6% | 62,2 | 8,9% | 62,1 | 8,6% |

k: 3,58% 3,84% 3,61% 3,62% 3,71% 3,71%

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{max}, g/cm³: | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | ROPT-30-1 | | ROPT-30-2 | | ROPT-30-3 | | ROPT-30-4 | | ROPT-30-5 | | ROPT-30-6 | |
|-----|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | P, g | 2547,3 | P, g | 2540,8 | P, g | 2535,8 | P, g | 2546,2 | P, g | 2541,3 | P, g | 2531,8 |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 72,0 | 20,7% | 70,5 | 19,2% | 74,1 | 23,3% | 69,8 | 18,3% | 70,5 | 19,2% | 72,9 | 22,1% |
| 5 | 71,3 | 19,9% | 69,8 | 18,4% | 73,3 | 22,4% | 69,1 | 17,4% | 69,8 | 18,4% | 72,2 | 21,4% |
| 6 | 70,7 | 19,2% | 69,3 | 17,8% | 72,7 | 21,8% | 68,5 | 16,7% | 69,2 | 17,7% | 71,7 | 20,8% |
| 8 | 69,9 | 18,3% | 68,5 | 16,8% | 71,7 | 20,7% | 67,7 | 15,7% | 68,4 | 16,7% | 70,7 | 19,7% |
| 10 | 69,2 | 17,5% | 67,9 | 16,1% | 71,0 | 19,9% | 67,0 | 14,9% | 67,7 | 15,9% | 70,0 | 18,9% |
| 12 | 68,7 | 16,9% | 67,4 | 15,5% | 70,4 | 19,2% | 66,5 | 14,2% | 67,2 | 15,2% | 69,4 | 18,2% |
| 16 | 67,8 | 15,8% | 66,6 | 14,4% | 69,6 | 18,3% | 65,7 | 13,2% | 66,3 | 14,1% | 68,5 | 17,1% |
| 20 | 67,2 | 15,0% | 66,1 | 13,8% | 68,9 | 17,5% | 65,1 | 12,4% | 66,7 | 14,6% | 67,9 | 16,4% |
| 25 | 66,6 | 14,3% | 65,5 | 13,0% | 68,2 | 16,6% | 64,4 | 11,4% | 65,1 | 12,5% | 67,2 | 15,5% |
| 32 | 66,0 | 13,5% | 64,9 | 12,2% | 67,5 | 15,8% | 63,7 | 10,4% | 64,5 | 11,7% | 66,6 | 14,8% |
| 40 | 65,5 | 12,8% | 64,4 | 11,5% | 66,9 | 15,0% | 63,3 | 9,9% | 63,9 | 10,8% | 66,0 | 14,0% |
| 50 | 65,0 | 12,2% | 63,9 | 10,8% | 66,4 | 14,4% | 62,8 | 9,2% | 63,4 | 10,1% | 65,4 | 13,2% |
| 64 | 64,4 | 11,3% | 63,3 | 10,0% | 65,8 | 13,6% | 62,3 | 8,4% | 62,8 | 9,3% | 64,8 | 12,4% |
| 80 | 64,0 | 10,8% | 62,9 | 9,4% | 65,3 | 12,9% | 61,9 | 7,8% | 62,3 | 8,6% | 64,3 | 11,7% |
| 100 | 63,6 | 10,2% | 62,5 | 8,8% | 64,9 | 12,4% | 61,5 | 7,3% | 62,0 | 8,1% | 63,9 | 11,2% |

k: 3,31% 3,25% 3,44% 3,49% 3,52% 3,49%

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{max}, g/cm³: | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | ROPT-1 | | ROPT-2 | | ROPT-3 | | ROPT-4 | | ROPT-5 | | ROPT-6 | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P, g | 2551,4 | P, g | 2579,3 | P, g | 2552,6 | P, g | 2541,2 | P, g | 2544,4 | P, g | 2529,6 |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 70,8 | 19,2% | 74,3 | 22,2% | 71,6 | 20,1% | 70,6 | 19,3% | 70,7 | 19,4% | 71,3 | 20,5% |
| 5 | 70,2 | 18,5% | 73,5 | 21,3% | 70,8 | 19,2% | 69,9 | 18,5% | 69,9 | 18,4% | 70,5 | 19,6% |
| 6 | 69,7 | 18,0% | 72,9 | 20,7% | 70,2 | 18,5% | 69,4 | 17,9% | 69,3 | 17,7% | 70,0 | 19,0% |
| 8 | 68,8 | 16,9% | 72,0 | 19,7% | 69,3 | 17,4% | 68,6 | 17,0% | 68,3 | 16,5% | 69,0 | 17,8% |
| 10 | 68,1 | 16,0% | 71,3 | 18,9% | 68,6 | 16,6% | 67,9 | 16,1% | 67,6 | 15,7% | 68,4 | 17,1% |
| 12 | 67,6 | 15,4% | 70,7 | 18,2% | 68,0 | 15,9% | 67,4 | 15,5% | 66,9 | 14,8% | 67,8 | 16,3% |
| 16 | 66,7 | 14,3% | 69,8 | 17,2% | 67,1 | 14,7% | 66,5 | 14,3% | 66,2 | 13,9% | 66,9 | 15,2% |
| 20 | 66,1 | 13,5% | 69,1 | 16,3% | 66,5 | 14,0% | 65,9 | 13,6% | 65,5 | 13,0% | 66,2 | 14,3% |
| 25 | 65,5 | 12,7% | 68,4 | 15,5% | 65,9 | 13,2% | 65,3 | 12,8% | 64,9 | 12,2% | 65,5 | 13,4% |
| 32 | 64,9 | 11,9% | 67,7 | 14,6% | 65,2 | 12,2% | 64,6 | 11,8% | 64,2 | 11,2% | 64,8 | 12,5% |
| 40 | 64,3 | 11,1% | 67,1 | 13,8% | 64,7 | 11,6% | 64,0 | 11,0% | 63,6 | 10,4% | 64,2 | 11,7% |
| 50 | 63,8 | 10,4% | 66,5 | 13,1% | 64,1 | 10,7% | 63,5 | 10,3% | 63,1 | 9,6% | 63,6 | 10,8% |
| 64 | 63,2 | 9,5% | 65,9 | 12,3% | 63,6 | 10,0% | 62,9 | 9,4% | 62,5 | 8,8% | 63,0 | 10,0% |
| 80 | 62,7 | 8,8% | 65,4 | 11,6% | 63,1 | 9,3% | 62,5 | 8,9% | 62,0 | 8,0% | 62,5 | 9,2% |
| 100 | 62,3 | 8,2% | 64,9 | 10,9% | 62,7 | 8,7% | 62,1 | 8,3% | 61,6 | 7,4% | 62,1 | 8,7% |

k: 3,50% 3,55% 3,57% 3,52% 3,74% 3,75%

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d_{max}, g/cm³: | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 | 2,525 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

| N# | ROPT+30-1 | | ROPT+30-2 | | ROPT+30-3 | | ROPT+30-4 | | ROPT+30-5 | | ROPT+30-6 | |
|-----|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | P, g | 2546,4 | P, g | 2533,4 | P, g | 2542,2 | P, g | 2546,2 | P, g | 2542,4 | P, g | 2536,3 |
| | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v | H, mm | v |
| 4 | 74,5 | 23,4% | 71,8 | 20,9% | 72,1 | 21,0% | 71,0 | 19,7% | 69,8 | 18,4% | 71,6 | 20,6% |
| 5 | 73,6 | 22,5% | 71,1 | 20,1% | 71,4 | 20,2% | 70,4 | 19,0% | 69,1 | 17,6% | 70,8 | 19,7% |
| 6 | 73,1 | 22,0% | 70,5 | 19,4% | 70,9 | 19,7% | 69,9 | 18,4% | 68,6 | 17,0% | 70,3 | 19,1% |
| 8 | 72,2 | 21,0% | 69,5 | 18,3% | 69,9 | 18,5% | 69,0 | 17,4% | 67,7 | 15,9% | 69,3 | 18,0% |
| 10 | 71,5 | 20,2% | 68,8 | 17,4% | 69,2 | 17,7% | 68,3 | 16,5% | 66,9 | 14,8% | 68,6 | 17,1% |
| 12 | 71,0 | 19,7% | 68,2 | 16,7% | 68,6 | 17,0% | 67,8 | 15,9% | 66,4 | 14,2% | 68,0 | 16,4% |
| 16 | 70,1 | 18,6% | 67,2 | 15,5% | 67,8 | 16,0% | 67,0 | 14,9% | 65,5 | 13,0% | 67,0 | 15,2% |
| 20 | 69,5 | 17,9% | 66,6 | 14,7% | 67,1 | 15,1% | 66,4 | 14,1% | 64,9 | 12,2% | 66,4 | 14,4% |
| 25 | 68,9 | 17,2% | 65,9 | 13,8% | 66,4 | 14,2% | 65,7 | 13,2% | 64,3 | 11,4% | 65,7 | 13,5% |
| 32 | 68,2 | 16,4% | 65,2 | 12,9% | 65,7 | 13,3% | 65,1 | 12,4% | 63,6 | 10,4% | 65,1 | 12,7% |
| 40 | 67,7 | 15,7% | 64,7 | 12,2% | 65,1 | 12,5% | 64,5 | 11,6% | 63,0 | 9,6% | 64,5 | 11,9% |
| 50 | 67,1 | 15,0% | 64,1 | 11,4% | 64,5 | 11,7% | 63,9 | 10,8% | 62,5 | 8,9% | 64,0 | 11,2% |
| 64 | 66,5 | 14,2% | 63,5 | 10,5% | 63,9 | 10,9% | 63,3 | 9,9% | 61,9 | 8,0% | 63,4 | 10,4% |
| 80 | 66,1 | 13,7% | 63,0 | 9,8% | 63,4 | 10,2% | 62,9 | 9,3% | 61,4 | 7,2% | 62,9 | 9,6% |
| 100 | 65,6 | 13,0% | 62,6 | 9,2% | 62,9 | 9,5% | 62,4 | 8,6% | 61,0 | 6,6% | 62,5 | 9,1% |

k: 3,23% 3,70% 3,65% 3,51% 3,73% 3,66%

Tabella 5.20: Vuoti dopo pressa a taglio giratoria (150 mm).

Il primo grafico della figura 5.7 e la figura 5.8 rappresentano la variazione dei vuoti all'aumentare dal numero di cicli della pressa giratoria. Si può osservare, soprattutto nella prima immagine, che le miscele contenente ringiovanente hanno una minore quantità di vuoti rispetto il conglomerato senza fresato.

Il secondo grafico rappresenta la lavorabilità (*workability*) delle miscele ottenuta attraverso i valori medi (*k*) riassunti nelle tabelle precedenti. La lavorabilità è una caratteristica fondamentale dei conglomerati bituminosi in quanto rappresenta il valore che indica la capacità del materiale di essere utilizzato in condizione avverse, una maggiore facilità nell'esecuzione dei lavori in fase di posa in opera e nella compattazione.

Come si osserva dalle immagini il valore di lavorabilità medio delle miscele è molto simile, ciò indica che l'utilizzo dell'additivo ringiovanente permette di ottenere un miglioramento del bitume invecchiato riportandolo alle condizioni iniziali.

Si può affermare che la miscela con il contenuto ottimale di additivo ROPT presenta il valore più ravvicinato alla miscela di riferimento BASE. L'aumento o la diminuzione del ringiovanente rispetto al quantitativo ottimale porta, sicuramente, ad un miglioramento delle prestazioni ma ridotto rispetto al caso precedente.

Si può presupporre che aumentando o diminuendo ulteriormente il quantitativo di additivo all'interno della miscela si possano riscontrare valori che si distanziano maggiormente dalla miscela non contenente il RAP.

Tuttavia, alla luce della scarsa variabilità dei valori di lavorabilità, è verosimile ritenere che le miscele contenenti fresato, con un quantitativo di ringiovanente attorno ai valori ottimali, presentino lavorabilità molto simile, anche rispetto al conglomerato di riferimento. In altri termini, si può verosimilmente affermare che l'utilizzo del ringiovanente, attorno al quantitativo ottimale, consente di ottenere lavorabilità molto simili a quelle di miscele convenzionali, nonostante una significativa presenza di fresato (60%).

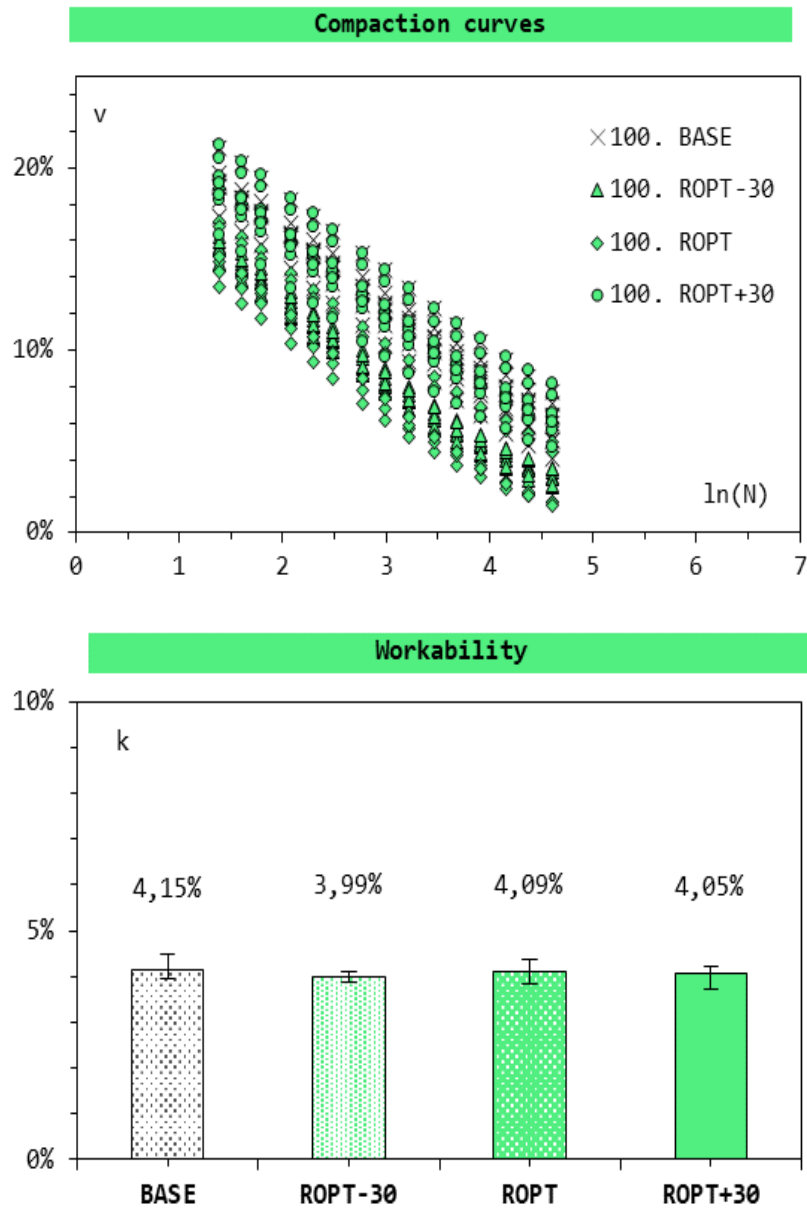


Figura 5.7: Curva di compattazione e lavorabilità (100 mm).

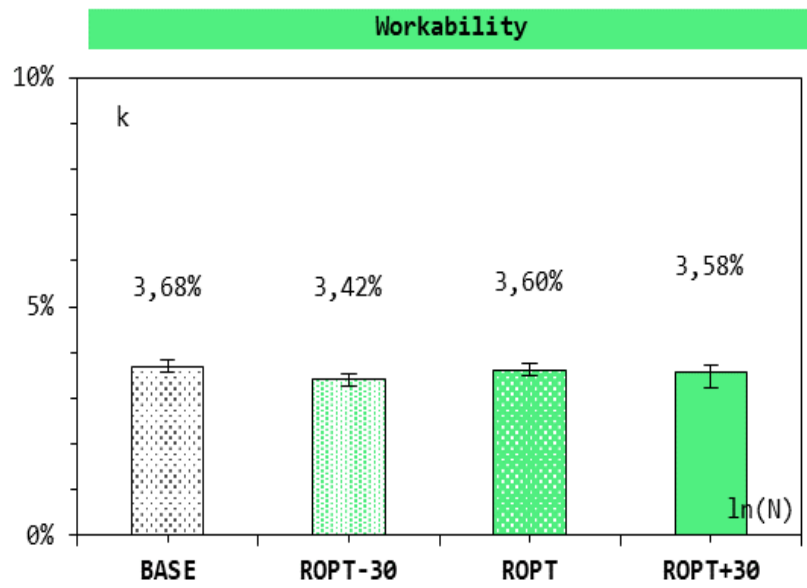
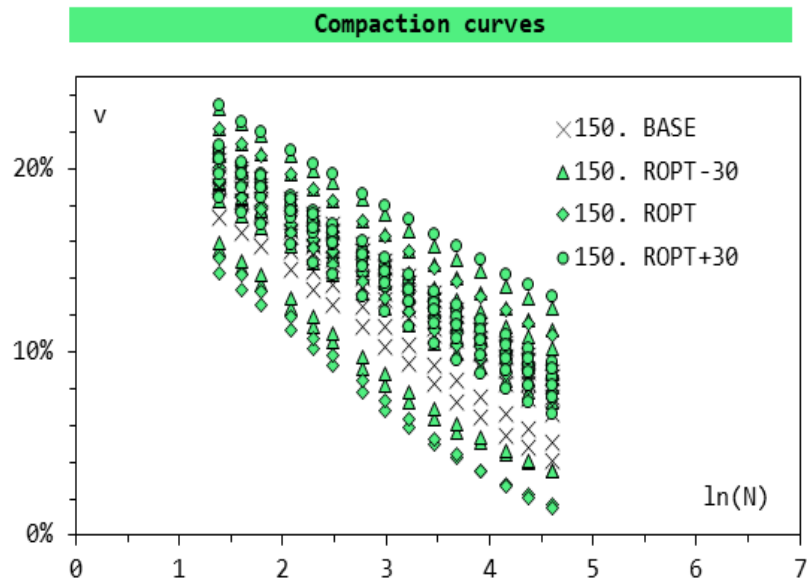


Figura 5.8: Curva di compattazione e lavorabilità (150 mm).

5.3.3 Rigidezza

I moduli di rigidezza dei vari campioni ottenuti mediante la prova ITSM sono riassunti nella *tabella 5.21* sottostante. È stato calcolato il valore medio per ogni tipologia di conglomerato bituminoso e, mediante questo, si è realizzato il grafico in *figura 5.9*.

Come si osserva dal grafico, ma anche dai valori in *tabella 5.22*, le miscele contenenti ringiovanente hanno valori del modulo elastico nettamente superiori della miscela di riferimento non contenente il fresato. Si può dedurre, dall'andamento dei valori, che un maggiore utilizzo dell'additivo ringiovanente comporta un aumento del modulo della miscela.

Questo comportamento è dovuto alla presenza del bitume invecchiato nel RAP che conferisce al conglomerato una maggiore rigidezza.

| Sample ID | ITSM, MPa |
|------------------|------------------|
| BASE-1-a | 2227 |
| BASE-1-b | 1953 |
| BASE-2-a | 2655 |
| BASE-2-b | 2728 |
| BASE-3-a | 2691 |
| BASE-3-b | 2527 |
| BASE-4-a | 2656 |
| BASE-4-b | 2512 |
| BASE-5-a | 2117 |
| BASE-5-b | 1765 |
| BASE-6-a | 2330 |
| BASE-6-b | 2168 |
| BASE-7-a | 2248 |
| BASE-7-b | 2019 |
| BASE-8-a | 2272 |
| BASE-8-b | 2176 |

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-------------|-----------|
| ROPT-30-1-a | 5401 |
| ROPT-30-1-b | 5598 |
| ROPT-30-2-a | 5131 |
| ROPT-30-2-b | 5242 |
| ROPT-30-3-a | 5709 |
| ROPT-30-3-b | 5714 |
| ROPT-30-4-a | 5559 |
| ROPT-30-4-b | 5302 |
| ROPT-30-5-a | 4838 |
| ROPT-30-5-b | 4517 |
| ROPT-30-6-a | 4530 |
| ROPT-30-6-b | 4645 |
| ROPT-30-7-a | 4654 |
| ROPT-30-7-b | 4448 |
| ROPT-30-8-a | 4949 |
| ROPT-30-8-b | 4193 |

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-----------|-----------|
| ROPT-1-a | 6253 |
| ROPT-1-b | 5840 |
| ROPT-2-a | 6243 |
| ROPT-2-b | 7051 |
| ROPT-3-a | 6769 |
| ROPT-3-b | 6098 |
| ROPT-4-a | 6637 |
| ROPT-4-b | 6786 |
| ROPT-5-a | 4063 |
| ROPT-5-b | 4239 |
| ROPT-6-a | 3338 |
| ROPT-6-b | 3789 |
| ROPT-7-a | 3790 |
| ROPT-7-b | 3818 |
| ROPT-8-a | 4718 |
| ROPT-8-b | 4645 |

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-------------|-----------|
| ROPT+30-1-a | 6924 |
| ROPT+30-1-b | 5471 |
| ROPT+30-2-a | 6365 |
| ROPT+30-2-b | 6674 |
| ROPT+30-3-a | 6541 |
| ROPT+30-3-b | 6586 |
| ROPT+30-4-a | 6786 |
| ROPT+30-4-b | 6232 |
| ROPT+30-5-a | 4888 |
| ROPT+30-5-b | 5556 |
| ROPT+30-6-a | 5041 |
| ROPT+30-6-b | 5268 |
| ROPT+30-7-a | 5212 |
| ROPT+30-7-b | 4731 |
| ROPT+30-8-a | 3951 |
| ROPT+30-8-b | 5057 |

Tabella 5.21: Risultati modulo di rigidità provini 100 mm.

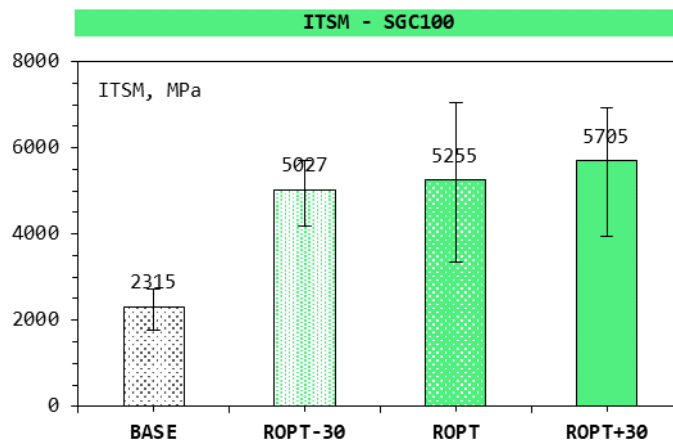


Figura 5.9: Modulo di rigidità medio provini 100 mm.

Medesimi risultati sono stati riscontrati con i provini di diametro pari a 150 mm. In questi campioni, però, non si può affermare che l'aumento del ringiovanente in miscela comporti un incremento delle prestazioni del conglomerato bituminoso in esame. Infatti, i risultati maggiori sono stati riscontrati nei provini della miscela ROPT-30 in cui si ha un quantitativo di ringiovanente ridotto rispetto all'ottimale.

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-----------|-----------|
| BASE-1 | 1895 |
| BASE-2 | 2240 |
| BASE-3 | 2595 |
| BASE-4 | 1421 |
| BASE-5 | 1788 |
| BASE-6 | 1779 |

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-----------|-----------|
| ROPT-30-1 | 4333 |
| ROPT-30-2 | 4044 |
| ROPT-30-3 | 4091 |
| ROPT-30-4 | 6183 |
| ROPT-30-5 | 5981 |
| ROPT-30-6 | 5536 |

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-----------|-----------|
| ROPT-1 | 3408 |
| ROPT-2 | 2376 |
| ROPT-3 | 3954 |
| ROPT-4 | 4880 |
| ROPT-5 | 4949 |
| ROPT-6 | 5299 |

| Sample ID | ITSM, MPa |
|-----------|-----------|
| ROPT+30-1 | 3826 |
| ROPT+30-2 | 4440 |
| ROPT+30-3 | 3868 |
| ROPT+30-4 | 4385 |
| ROPT+30-5 | 5325 |
| ROPT+30-6 | 4907 |

Tabella 5.22: Risultati modulo di rigidezza provini 150 mm.

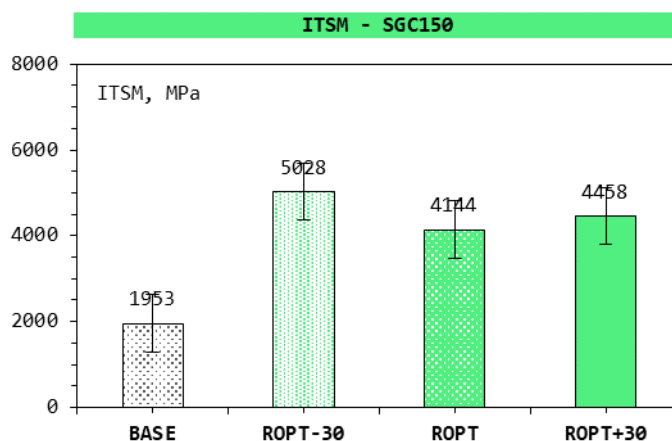


Figura 5.10: Modulo di rigidezza medio provini 150 mm.

I risultati ottenuti nella prova ITSM sono stati confermati dai test di flessione su quattro punti (4PB) in termini di modulo di rigidezza. Come si nota in *tabella 5.23* e nella *figura 5.11*, la flessione viene eseguita con frequenze differenti, in modo da osservare la variazione del modulo di rigidezza in funzione della velocità di applicazione dei carichi.

I risultati ottenuti confermano, in tutte le prove, che le miscele contenenti il fresato e l'additivo ringiovanente hanno comunque una maggiore rigidezza rispetto alle miscele di riferimento senza fresato. Osservando i valori delle miscele contenenti fresato si osserva una possibile dipendenza dei moduli dal quantitativo del ringiovanente. Questo può essere affermato dal momento che all'aumentare dell'additivo si ha una diminuzione della rigidezza del materiale. Il ringiovanente sembra quindi conferire ai campioni (in particolare alla fase legante) una rigidezza via via minore, all'aumentare del suo contenuto.

Inoltre, i risultati dell'angolo di fase permettono di constatare che i conglomerati contenenti fresato hanno una risposta maggiormente elastica rispetto a quelli di riferimento (minori valori assoluti dell'angolo di fase), ciò proporzionalmente alla

quantità di additivo. Complessivamente, i risultati della prova di flessione su 4 punti evidenziano come l'additivo non diminuisce solamente la rigidità delle miscele, ma sembra in grado di ripristinare caratteristiche di elasticità che possono essere cruciali nelle prestazioni del conglomerato, nonostante la presenza di un apprezzabile quantitativo di fresato contenente bitume invecchiato (60%). Non si apprezzano, infine, sensibili differenze di prestazioni fra le varie miscele in termini di dipendenza dalla velocità di applicazione dei carichi.

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|--------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| BASE_1 | 548 MPa | 692 MPa | 1005 MPa | 1369 MPa | 1851 MPa | 2723 MPa | 3498 MPa | 4474 MPa |
| BASE_2 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| BASE_3 | 557 MPa | 738 MPa | 1086 MPa | 1448 MPa | 1948 MPa | 2882 MPa | 3705 MPa | 4789 MPa |
| BASE_4 | 380 MPa | 462 MPa | 699 MPa | 1014 MPa | 1477 MPa | 2354 MPa | 3300 MPa | 4237 MPa |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| ROPT-30_1 | 997 MPa | 1278 MPa | 1743 MPa | 2166 MPa | 2672 MPa | 3490 MPa | 4128 MPa | 4836 MPa |
| ROPT-30_2 | 2186 MPa | 2745 MPa | 3697 MPa | 4620 MPa | 5644 MPa | 7298 MPa | 8675 MPa | 10253 MPa |
| ROPT-30_3 | 1279 MPa | 1606 MPa | 2170 MPa | 2667 MPa | 3266 MPa | 4215 MPa | 4953 MPa | 5787 MPa |
| ROPT-30_4 | 1216 MPa | 1536 MPa | 2058 MPa | 2522 MPa | 3104 MPa | 3989 MPa | 4660 MPa | 5421 MPa |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ROPT_1 | 1001 MPa | 1280 MPa | 1768 MPa | 2262 MPa | 2890 MPa | 3838 MPa | 4679 MPa | 5639 MPa |
| ROPT_2 | 1389 MPa | 1782 MPa | 2469 MPa | 3167 MPa | 4057 MPa | 5411 MPa | 6584 MPa | 7917 MPa |
| ROPT_3 | 1309 MPa | 1663 MPa | 2325 MPa | 2990 MPa | 3801 MPa | 5046 MPa | 6109 MPa | 7278 MPa |
| ROPT_4 | 1345 MPa | 1663 MPa | 2240 MPa | 2796 MPa | 3464 MPa | 4478 MPa | 5380 MPa | 6361 MPa |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ROPT+30_1 | 870 MPa | 1152 MPa | 1666 MPa | 2176 MPa | 2849 MPa | 3880 MPa | 5446 MPa | 6615 MPa |
| ROPT+30_2 | 1408 MPa | 1787 MPa | 2485 MPa | 3159 MPa | 4023 MPa | 5438 MPa | 6635 MPa | 8059 MPa |
| ROPT+30_3 | 787 MPa | 977 MPa | 1318 MPa | 1685 MPa | 2121 MPa | 2800 MPa | 3505 MPa | 4277 MPa |
| ROPT+30_4 | 902 MPa | 1171 MPa | 1632 MPa | 2110 MPa | 2683 MPa | 3590 MPa | 4355 MPa | 5273 MPa |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| BASE_1 | 37,60° | 40,50° | 41,50° | 41,30° | 39,80° | 36,80° | 34,50° | 32,10° |
| BASE_2 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| BASE_3 | 41,00° | 43,00° | 43,30° | 42,70° | 41,10° | 37,60° | 34,90° | 32,50° |
| BASE_4 | 31,60° | 37,50° | 38,70° | 37,00° | 34,60° | 31,50° | 30,20° | 27,70° |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| ROPT-30_1 | 33,20° | 32,60° | 31,00° | 29,50° | 27,80° | 25,40° | 23,80° | 22,40° |
| ROPT-30_2 | 34,10° | 33,40° | 31,50° | 30,00° | 28,10° | 25,50° | 23,80° | 22,40° |
| ROPT-30_3 | 33,30° | 32,50° | 30,70° | 28,90° | 27,10° | 24,60° | 23,00° | 21,40° |
| ROPT-30_4 | 33,00° | 32,20° | 30,30° | 28,60° | 26,70° | 24,00° | 22,60° | 21,40° |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| ROPT_1 | 36,00° | 35,70° | 34,90° | 33,50° | 31,70° | 28,80° | 26,90° | 25,10° |
| ROPT_2 | 36,70° | 36,70° | 35,40° | 33,90° | 31,90° | 28,80° | 26,80° | 24,90° |
| ROPT_3 | 35,40° | 35,50° | 34,60° | 33,10° | 31,20° | 28,30° | 26,20° | 24,20° |
| ROPT_4 | 38,50° | 38,30° | 36,80° | 34,70° | 30,80° | 27,70° | 26,10° | 24,70° |

| Sample | 0,1 Hz | 0,2 Hz | 0,5 Hz | 1,0 Hz | 2,0 Hz | 5,0 Hz | 10,0 Hz | 20,0 Hz |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| ROPT+30_1 | 29,50° | 33,60° | 32,40° | 31,90° | 30,56° | 28,65° | 26,98° | 20,20° |
| ROPT+30_2 | 37,80° | 38,00° | 36,60° | 35,00° | 33,10° | 30,10° | 28,10° | 26,20° |
| ROPT+30_3 | 28,10° | 28,70° | 28,20° | 26,40° | 24,10° | 20,70° | 17,60° | 15,30° |
| ROPT+30_4 | 36,50° | 36,20° | 35,10° | 33,60° | 32,10° | 29,30° | 27,60° | 25,80° |

Tabella 5.23: Risultati modulo di rigidità provini e angolo di fase travetti.

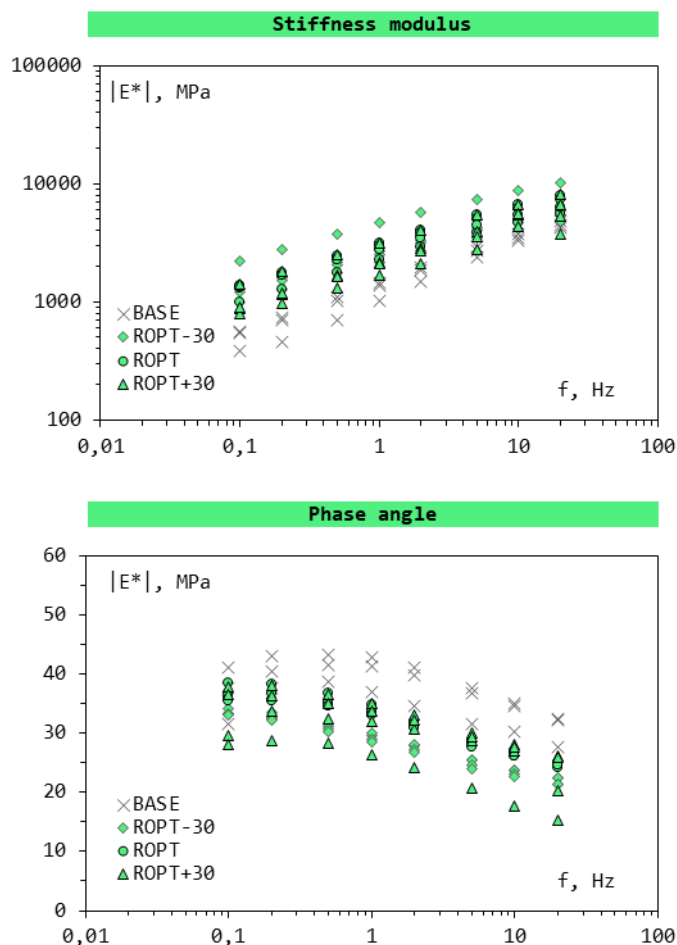


Figura 5.10: Grafici modulo di rigidità e angolo di fase travetti.

5.3.4 Resistenza alla fessurazione a basse temperature

La prova ITS, descritta nel paragrafo §4.4.2, è stata eseguita alla temperatura di 0°C . I risultati sono stati riassunti nelle *tabelle* 5.24.

I valori di resistenza a trazione indiretta tra i vari campioni sono molto ravvicinati. Si può individuare un risultato più elevato, per la miscela avente il contenuto ottimale di ringiovanente, dovuto alla presenza dell'additivo che conferisce al conglomerato una minore resistenza.

È da notare che i provini aventi il 30% in più di additivo hanno ottenuto risultati in controtendenza rispetto alle altre miscele contenenti il ringiovanente. I campioni di ROPT+30 hanno riportato anche un valore di resistenza minore della miscela di riferimento. Ciò ci permette di affermare che l'additivo ha un impatto

elevato sulle prestazioni del conglomerato e che il suo dosaggio deve essere adeguato a ottenere valori ottimali.

Nella *figura 5.11* è rappresentato il grafico dei valori medi della resistenza a trazione alla temperatura di 0°C.

| BASE | |
|-----------|----------|
| Sample ID | ITS, MPa |
| BASE-1-b | 3,731 |
| BASE-5-a | 3,934 |
| BASE-6-b | 3,767 |
| BASE-7-b | 4,045 |
| BASE-8-b | 4,192 |

| ROPT | |
|-----------|----------|
| Sample ID | ITS, MPa |
| ROPT-5-a | 5,089 |
| ROPT-5-b | 4,589 |
| ROPT-6-b | 4,986 |
| ROPT-7-a | 4,812 |
| ROPT-7-b | 4,778 |

| ROPT-30 | |
|-------------|----------|
| Sample ID | ITS, MPa |
| ROPT-30-5-a | 4,897 |
| ROPT-30-5-b | 4,914 |
| ROPT-30-6-b | 4,582 |
| ROPT-30-7-a | 4,566 |
| ROPT-30-7-b | 4,286 |

| ROPT+30 | |
|-------------|----------|
| Sample ID | ITS, MPa |
| ROPT+30-5-a | 3,404 |
| ROPT+30-6-a | 3,721 |
| ROPT+30-7-a | 3,204 |
| ROPT+30-7-b | 2,710 |
| ROPT+30-8-b | 3,667 |

Tabella 5.24: Risultati prova ITS.

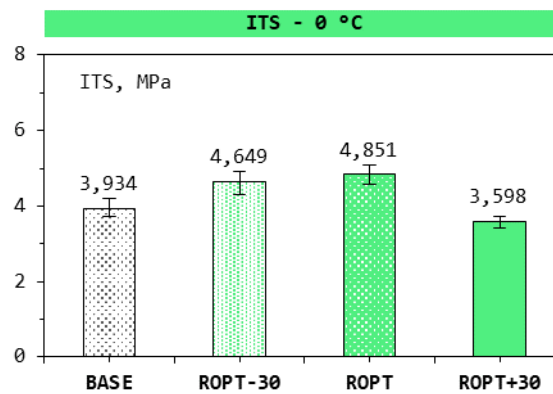


Figura 5.11: Grafico risultati prova ITS.

Nella *figura 5.12* è rappresentata la curva di resistenza e deformazione per ogni provino testato alla prova ITS. Calcolando l'area sottesa da ogni curva è possibile ottenere l'energia dissipata, *figura 5.13*. Quest'ultima immagine permette di osservare come la miscela avente un quantitativo elevato di additivo permetta un valore maggiore di energia dissipata. Invece, la miscela con un quantitativo ridotto di ringiovanente permette di ottenere un'energia dissipata minore del conglomerato base.

Ancora una volta si conferma che la variazione del contenuto di additivo modifica fortemente le prestazioni del materiale.

Un valore elevato permette di ottenere una dissipazione di energia maggiore ma un valore di resistenza a trazione indiretta minore. Viceversa avviene se il quantitativo è inferiore a quello ottimale. Nonostante i maggiori valori di ITS a bassa temperatura per le miscele contenenti fresato (possibile indicazione di eccessiva fragilità), i dati relativi all'energia dissipata suggeriscono che tali conglomerati (in particolar modo nel caso di dosaggio ottimale di ringiovanente) possano garantire adeguate prestazioni in esercizio nei confronti della fessurazione termica (comparabili con quelle della miscela di riferimento).

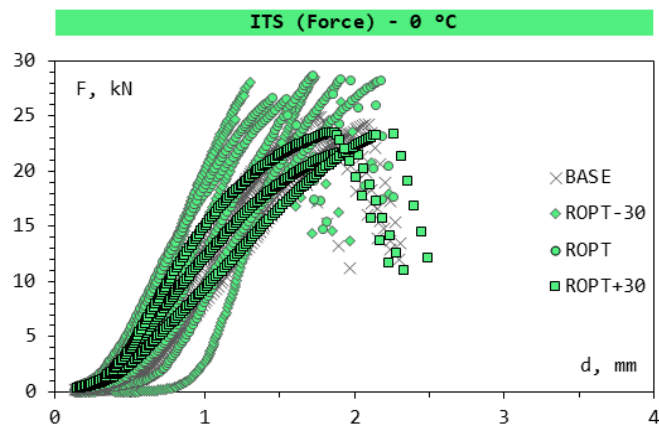


Figura 5.12: Curve di resistenza prova ITS.

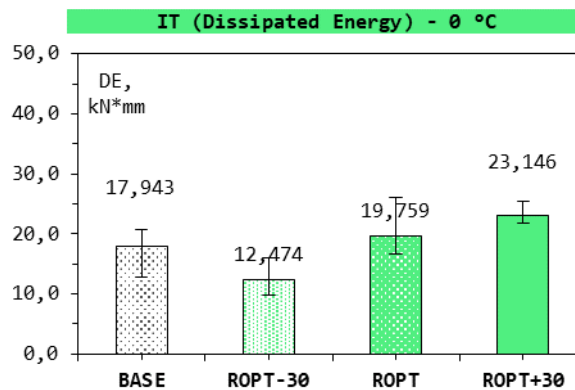


Figura 5.13: Energia dissipata prova ITS.

5.3.5 Resistenza alle deformazioni permanenti

Le prove per determinare le deformazioni permanenti del materiale che sono state eseguite sui campioni sono la *repeated load axial test* (RLAT) e la *wheel track* (WT). Il test RLAT è stato eseguito su vari provini modificando la tensione applicata. Nella *figura 5.14* sono rappresentati i tre grafici, uno per ogni tensione di carico, ottenuti dai valori di deformazioni dei campioni durante la prova.

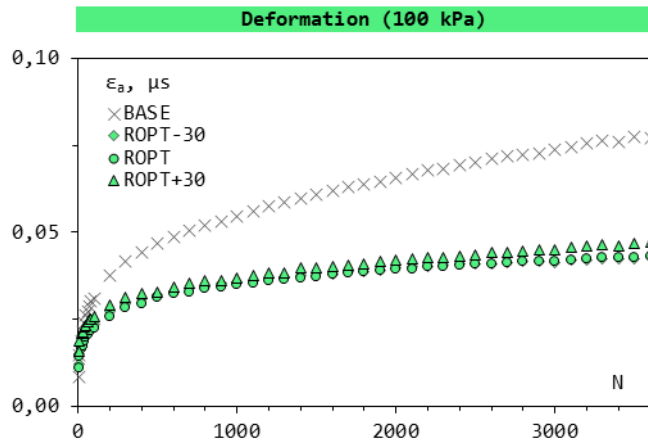
È evidente come le miscele contenenti il fresato e l'additivo abbiano ottenuto valori identici in tutte e tre le configurazioni di prova. La miscela base, non contenente il fresato, è caratterizzata da valori di deformazioni molto elevati

rispetto alle altre miscele. Inoltre, quest'ultima nella prova a 500 kPa è arrivata a rottura ad un numero di cicli basso.

Queste prestazioni differenti sono dovute alla presenza del RAP che conferisce alla miscela una maggiore rigidità e resistenza alle deformazioni. È da notare che il bitume vergine è caratterizzato da elevati valori di penetrazione (e, di conseguenza, ridotte prestazioni alle alte temperature) che portano i provini BASE ad avere dei risultati mediocri.

A tale proposito è verosimile ipotizzare che l'impianto dal quale è stato prelevato il bitume vergine fosse in possesso di tale tipologia di legante in virtù della consueta introduzione di significative quantità di fresato (con bitume rigido/invecchiato) che quindi richiede spesso di compensare le prestazioni con bitumi vergini *soft*.

In conclusione, le miscele contenenti fresato risultano avere migliori prestazioni circa le deformazioni permanenti accumulate alle alte temperature di esercizio.



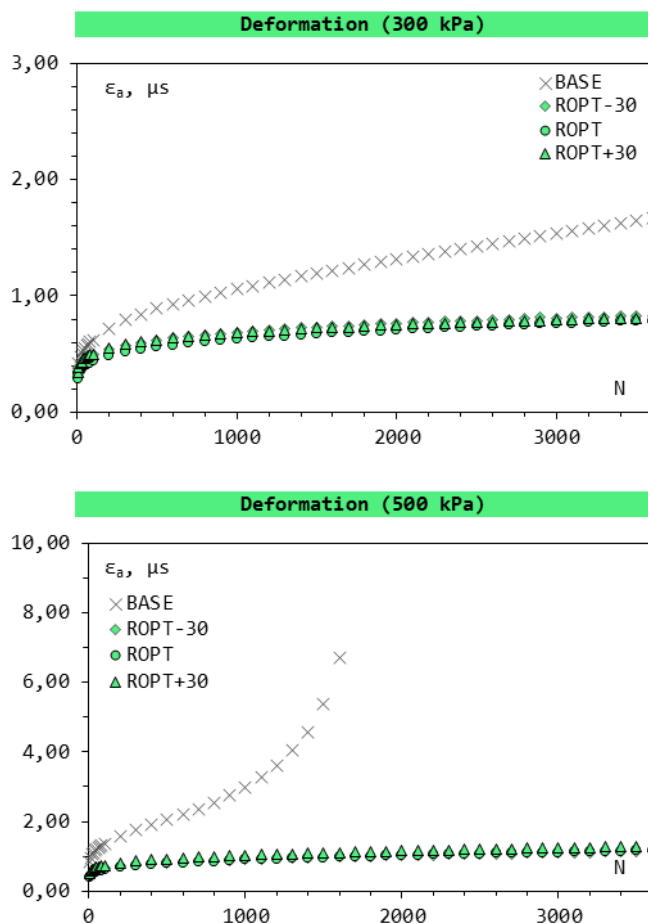


Figura 5.14: Grafici deformazione permanente RLAT.

La prova WT, con i risultati riassunti in *tabella 5.25* e in *figura 5.15*, conferma quanto ottenuto della prova RLAT.

Infatti, la deformazione dovuta al pneumatico sulla lastra di dimensioni 300x400 mm si assesta ad un valore compreso tra i 3 e i 4 mm per le miscele contenenti il fresato e il ringiovanente. La miscela BASE, al termine della prova, ha un solco di profondità pari a 17 mm.

Dal grafico si può visualizzare l'andamento della deformazione ogni 250 cicli e si nota come i valori delle miscele ROPT, ROPT+30 e ROPT-30 siano coincidenti e presentino una curva piatta. La miscela BASE presenta una deformazione maggiore già a partire dal ciclo 500 e si osserva una curva che aumenta linearmente in modo costante.

Questi risultati sono dovuti, come nella prova precedente, alla presenza del RAP e soprattutto del bitume invecchiato che conferisce alla miscela una minore deformazione anche con la presenza del ringiovanente. Inoltre, come descritto sopra, il bitume vergine utilizzato è caratterizzato da un elevato valore di deformazione. Ciò risulta in accordo con quanto già identificato con le precedenti analisi RLAT.

Infine, è interessante notare come le miscele contenenti il fresato riescano a garantire prestazioni accettabili con riferimento a quanto indicato dai principali Capitolati Tecnici (valore massimo di accettabilità per WTS pari a 0.150 mm/10³ cicli), cosa non garantita dalla miscela convenzionale confezionata con i materiali costituenti e la curva granulometrica scelti.

| Sample ID | R _d , mm | WTS, mm/10 ³ cycles |
|-----------|---------------------|--------------------------------|
| BASE | 17,54 | 1,434 |
| ROPT-30 | 3,11 | 0,133 |
| ROPT | 3,75 | 0,116 |
| ROPT+30 | 3,50 | 0,140 |

Tabella 5.25: Risultati prova WT.

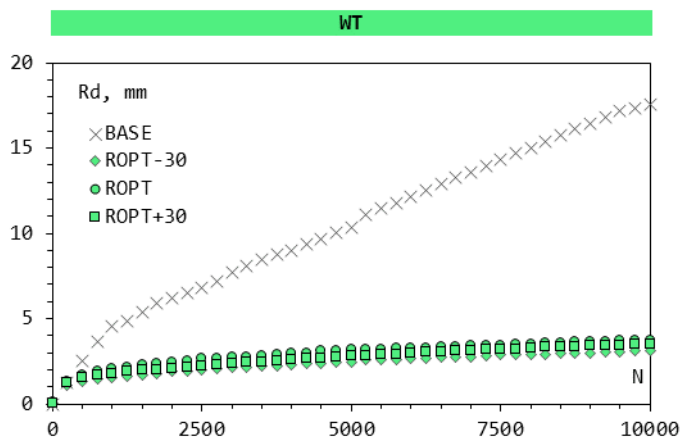


Figura 5.15: Grafici deformazione permanente WT.

5.3.6 Resistenza a fatica

La prova di flessione su quattro punti (4PB), realizzata per determinare la resistenza a fatica dei campioni prismatici di conglomerato bituminoso, ha fornito i risultati rappresentati nella *tabella 5.26* e nella *figura 5.16*.

Come si nota, è stato possibile eseguire quattro test per ogni tipologia di conglomerato, variando l'ampiezza della deformazione sinusoidale applicata.

Il grafico riporta le curve di fatica delle miscele considerando arbitrariamente la rottura per fatica dei provini corrispondente con il momento in cui il modulo iniziale (considerato al centesimo ciclo) subisce una riduzione del 50%. In tabella si sono riportati anche i valori calcolati considerando altri due differenti criteri di rottura: i) riduzione del 90% del modulo iniziale; ii) approccio energetico basato sull'evoluzione della *Dissipated Energy Ratio* (DER). A prescindere dalla tipologia di criterio impiegato, i valori di vita a fatica hanno fornito le stesse indicazioni rispetto alle prestazioni dei conglomerati (stesse indicazioni gerarchiche tra le miscele). Ad esempio, con riferimento al criterio del 50% (vedasi grafico), i risultati evidenziano come le miscele non contenenti il fresato (BASE) giungono a rottura con un numero di cicli nettamente inferiore rispetto alle altre miscele (a parità di deformazione applicata). In tal senso, è verosimile ritenere che il già citato incremento di elasticità dei conglomerati contenuti ringiovanente fosse in grado di prolungare sensibilmente la vita a fatica dei materiali (mitigazione dei problemi di fragilizzazione, e conseguente rottura a fatica).

I risultati sperimentali sembrano inoltre evidenziare come il contenuto ottimale di ringiovanente (miscela ROPT) fornisca effettivamente i migliori risultati in termini di resistenza a fatica.

Oltre alla vita utile identificata, è interessante notare la minore suscettibilità alla variazione dell'entità dei carichi per le miscele contenenti fresato (pendenza delle curve di fatica, ovvero sensibilità alla deformazione); anche in tale ambito, la quantità ottimale di ringiovanente (ROPT) dimostra notevoli potenzialità (curva avente tra le minori pendenze misurate).

| Sample | Fatigue | Cycles (50%) | Cycles (10%) | Cycles (DER) |
|--------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| BASE_1 | 100 μ s | --- | --- | --- |
| BASE_2 | 200 μ s | 350304 | 717141 | 515522 |
| BASE_3 | 300 μ s | 140174 | 256383 | 232997 |
| BASE_4 | 400 μ s | 106333 | 157681 | 147212 |

| Sample | Fatigue | Cycles (50%) | Cycles (10%) | Cycles (DER) |
|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| ROPT-30_1 | 100 μ s | 4956782 | 7739619 | 7175420 |
| ROPT-30_3 | 200 μ s | 197495 | 483996 | 361935 |
| ROPT-30_2 | 300 μ s | 37154 | 58013 | 53784 |
| ROPT-30_4 | 400 μ s | 4277 | 7845 | 6592 |

| Sample | Fatigue | Cycles (50%) | Cycles (10%) | Cycles (DER) |
|--------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| ROPT_4 | 200 μ s | 2528005 | 4154301 | 3818361 |
| ROPT_1 | 250 μ s | 343716 | 631480 | 539781 |
| ROPT_2 | 300 μ s | 94045 | 223544 | 184028 |
| ROPT_3 | 400 μ s | 15548 | 28565 | 24417 |

| Sample | Fatigue | Cycles (50%) | Cycles (10%) | Cycles (DER) |
|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| ROPT+30_3 | 200 μ s | 698948 | 1604657 | 1349696 |
| ROPT+30_2 | 300 μ s | 236230 | 465185 | 402111 |
| ROPT+30_4 | 400 μ s | 21380 | 41324 | 34135 |
| ROPT+30_1 | 500 μ s | 1845 | 3566 | 2946 |

Tabella 5.26: Resistenza a fatica travetti.

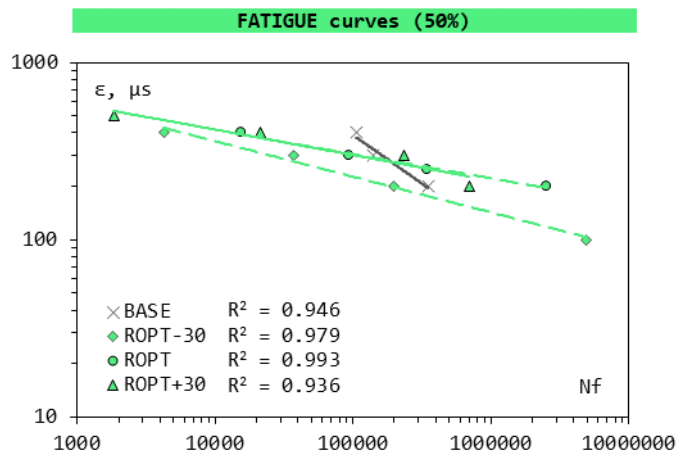


Figura 5.16: Grafico resistenza a fatica travetti.

CONCLUSIONI

La presente Tesi illustra i risultati di un lavoro sperimentale svolto presso il Laboratorio Stradale del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova riguardante il confronto delle prestazioni di miscele contenenti elevato quantitativo di fresato riciclato e differenti quantitativi di additivo ringiovanente.

Sulla base di quanto descritto ed evidenziato nei Capitoli precedenti, si riportano le principali osservazioni di seguito elencate:

- Dall'analisi a scala di legante, è stato individuato un dosaggio ottimale di additivo ringiovanente pari al 2,9% sul peso del bitume per la produzione di miscele bituminose contenenti il 60% di fresato (il valore è risultato compatibile con quanto indicato dalla scheda tecnica dell'additivo)

- Il composto ottenuto (bitume vergine + bitume invecchiato dal fresato + ringiovanente in quantitativo ottimale) ha fornito prestazioni del tutto comparabili a quello di un bitume vergine non modificato. Ciò, fissando un range di tolleranza delle prestazioni dell'ordine di $\pm 25\%$ delle prestazioni (è comunque da osservare che, nel caso di invecchiamento a lungo termine ed elevata rigidità, tale tolleranza è appena sufficiente).

- Nel confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso, la presenza di fresato e di additivo ringiovanente non ha determinato significative variazioni di lavorabilità rispetto al conglomerato di riferimento (senza fresato né additivi), nonostante la stessa temperatura di confezionamento. Ciò è verosimilmente avvenuto proprio in virtù della presenza di additivo ringiovanente (tale risultato può concretizzarsi in elevati benefici nella produzione su larga scala).

- Alla luce della presenza di fresato, i conglomerati riciclati hanno evidenziato una elevata rigidità rispetto alla miscela di riferimento. Tuttavia, sulla base di quanto desunto dai comportamenti alla fessurazione a basse temperature e alle caratteristiche viscoelastiche, tale rigidità non si è tradotta in una eccessiva

fragilizzazione dei materiali, scongiurando eventuali problemi strutturali (fessurativi) in diverse condizioni/temperature di esercizio.

- In termini di resistenza alla fatica, la maggiore elasticità conferita dal ringiovanente fornisce notevole resistenza alle miscele riciclate, che manifestano cedimenti a fatica ritardati rispetto al conglomerato tradizionale e risultano meno sensibili all'ampiezza di deformazione.

- Per quanto concerne le deformazioni permanenti alle alte temperature, le miscele riciclate, essendo più rigide per la presenza del fresato, ritardano/riducono la formazione di fenomeni di ormaiamento; la variazione del quantitativo di additivo all'interno del legante risulta scarsamente significativo in tal senso, soprattutto se si osserva la deformazione plastica.

Si può dunque concludere che, in generale, le prestazioni ottenute dai conglomerati riciclati con elevati tenori di materiale fresato sono risultate comparabili, e in alcuni casi anche superiori, a quelle esibite dalle miscele tradizionali. Va tuttavia osservato che la natura dei materiali utilizzati e il mix-design del conglomerato progettato, con particolare riferimento alle proprietà del bitume vergine di aggiunta, può avere limitato in senso assoluto le prestazioni della miscela di riferimento (soprattutto nei riguardi della rigidità e della resistenza alle deformazioni permanenti). In effetti, è prassi comune negli impianti di produzione quella di ricorrere all'utilizzo di leganti bituminosi vergine con consistenza piuttosto ridotta in previsione di una successiva introduzione in miscela finale di significative quantità di fresato a compensazione dell'elevata rigidità/fragilità del bitume invecchiato presente nel fresato.

In generale, comunque, le prestazioni ottenute nel caso dei conglomerati bituminosi contenenti fresato e differenti quantitativi di additivo ringiovanente sono risultate compatibili con quanto comunemente richiesto dai principali Capitolati Tecnici di settore. Per tale motivo, si ritiene che la procedura di

ottimizzazione del quantitativo di ringiovanente messa a punto a scala di legante sia stata efficacemente validata dai risultati ottenuti a scala di miscela.

BIBLIOGRAFIA

- ^[1] La pavimentazione stradale: i suoi 5 strati, futuri conglomerati, 2021.
<https://futuraconglomerati.it/la-pavimentazione-stradale/>
- ^[2] RELAZIONE Comparazione tecnica ed economica di pavimentazioni cementizie e bituminose in galleria, P. Di Mascio, L. Moretti, Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, 2017
- ^[3] Il monitoraggio delle pavimentazioni stradali col Pavement Condition Index, E. Bonvino, 2019.
<https://pavement.it/gestione/monitoraggio-pavimentazioni-stradali-col-pavement-condition-index/>
- ^[4] Asfalto riciclato, Asfalti.it.
<https://www.asfalti.it/cose-l-asfalto-riciclato/#:~:text=Il%20riciclaggio%20a%20caldo%20prevede,fin%20al%20100%25%20del%20prodotto.>
- ^[5] Sustainable Pavements, Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling, Andrew E. Alkins, Becca Lane, and Tom Kazmierowski, 2008.
- ^[6] Life Cycle Assessment of Asphalt Pavement Recycling for Greenhouse Gas Emission with Temporal Aspect, Xiaodan Chen, Hao Wang, Journal of Cleaner Production, 2018.
- ^[7] Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content, Qazi Aurangzeb, Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer, Rebekah Yang, 2014.
- ^[8] Effect of Aging on the Rheological Properties of Blends of Virgin and Rejuvenated RA Binders, Wang, 2023.
- ^[9] Rheology of Virgin Asphalt Binder Combined with High Percentages of RAP Binder Rejuvenated with Waste Vegetable Oil, Connor R. Dugan, Chris R. Sumter, Shivani Rani, S. Ashik Ali, Edgar A. O'Rear, and Musharraf Zaman, 2020.

- ^[10] Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenator, M.C. Cavalli, M. Zaumanis, E. Mazza, M.N. Partl, L.D. Poulikakos, 2018.
- ^[11] Performance of field produced rejuvenated 30% RAP surface mix in Northwest Iowa, Joseph H. Podolsky, Ali Arabzadeh, Barrie Saw, R. Christopher Williams, Eric W. Cochran & Hosin Lee, 2021
- ^[12] Asphalt concrete produced from rejuvenated reclaimed asphalt pavement (rap), W. Sorociak, B. Grzesik, J. Bzówka, P. Mieczkowski, 2020.
- ^[13] Laboratory Evaluation of the Effectiveness of Rejuvenation in Multiple Hot Recycling of Asphalt Mixtures, M. Passetto, 2022.
- ^[14] Evaluation of Waste Engine Oil-Rejuvenated Asphalt Concrete Mixtures with High RAP Content, A. A. Mamun and H. I. Al-Abdul Wahhab, 2018.
- ^[15] Fresato d'asfalto: rifiuto o sottoprodotto?, S. Ravaioli, SITEB, Rassegna del bitumen 69/11.
https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/6911_2.pdf
- ^[16] Riciclo delle pavimentazioni stradali, con +30% di fresato recuperato l'Italia cresce ma non basta, R. Auriemma, Ricicla News, 2021
https://www.riciclanews.it/istituzioni/associazioni-consorzi/nel-riciclo-delle-strade-crescita-contenuta-per-litalia-che-raggiunge-30-di-fresato-recuperato_15471.html
- ^[17] Il riciclaggio a freddo (in situ) è ecologico ed economico, Wirtgen Group.
<https://www.wirtgen-group.com/it-ch/applicazioni/costruzione-stradale/ripristino-stradale/riciclaggio-a-freddo-in-situ/#:~:text=Nella%20procedura%20di%20riciclaggio%20a,anche%20i%20tempi%20dei%20lavori.>
- ^[18] Riciclaggio a freddo, Ecovie.
<https://ecovie.it/riciclaggio-a-freddo/#:~:text=La%20rigenerazione%20in%20sito%20avviene,con%20le%20ganti%20bitumosi%20e%20cementizi.>
- ^[19] Strade, teoria e tecnica delle costruzioni stradali. Cap.10 – Costruzione della sovrastruttura stradale, Pearson, 2019.

- [20] CEDR Call2012: Recycling: Road construction in a post-fossil fuel society ALLBACK2PAVE. Toward a sustainable 100% recycling of reclaimed asphalt in road pavements. Deliverable No D3.1 AllBack2Pave End-User Manual, Gaetano di Mino, 2012.
- [21] Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali, Lucia Rosa, 2009-2010, Università degli Studi di Bologna.
- [22] RAP pro TM 100% Recycled Hot Mix Asphalt, Phoenix Industries.
<https://phoenixindustries.com/RAPpro.html>
- [23] Recycling, Ammann.
<https://www.ammann.com/en/technology/recycling>
- [24] The hot gas generator from Benninghoven, Benninghoven.
<https://www.wirtgen-group.com/en-de/products/benninghoven/technologies/recycling/hot-recycling/hot-gas-generator/>
- [25] Bitume, Treccani.
<https://www.treccani.it/vocabolario/bitume/>
- [26] La reologia dei leganti bituminosi stradali: studio delle proprietà meccaniche a seguito di processi di “aging” in laboratorio, Francesco Petretto, Università Degli Studi di Bologna, 2012.
- [27] Influenza di un additivo rigenerante sulle proprietà reologiche del bitume estratto dal RAP, Cariglia Giovannantonio Pio, Università Politecnica delle Marche, 2018/2019.
- [28] Categorisation and analysis of rejuvenators for asphalt recycling, L. De Bock, S. Vansteenkiste, N. Pierard, A. Vanelstraete, 2020.
- [29] Recommendation of RILEM TC 264 RAP on the evaluation of asphalt recycling agents for hot mix asphalt, Martin Hugener, Di Wang, Augusto Cannone Falchetto, 2022.
- [30] Dimms, Determinazione del contenuto di legante di miscele di bitume e aggregati lapidei.
http://www.dimms.eu/images/cms/02Determinazione_del_contenuto_di_1_egante_di_miscele_di_bitume_ed_aggregati_lapidei.pdf
- [31] Palla e anello, Treccani.

- <https://www.treccani.it/enciclopedia/palla-e-anello/#:~:text=Si%20pone%20una%20sferetta%20d,valore%20del%20pu nto%20di%20rammollimento>.
- ^[32] Rolling Thin Film Oven Test (rtfot). Invecchiamento a breve termine, EUROBITUME
https://www.eurobitume.eu/public_downloads/Technical/EB_Technical_Information_RTFOT_Italian_.pdf
- ^[33] Simulazione e valutazione dell'invecchiamento del bitume, SITEB
https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/2997_1.pdf
- ^[34] Pressure Ageing Vessel (Pav). Invecchiamento A Lungo Termine. EUROBITUME
https://www.eurobitume.eu/public_downloads/Technical/EB_Technical_Information_PAV_Italian_.pdf
- ^[35] Dynamic Shear Rheometer (DSR) modulo complesso g^* ed angolo di fase δ
https://www.eurobitume.eu/public_downloads/Technical/EB_Technical_Information_DSR_Italian_.pdf
- ^[36] ANALISI DELLA CORRELAZIONE TRA LE PROPRIETÀ FISICHE E MECCANICHE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO, Lorenzo Lugli, UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE, 2020.
- ^[37] Il modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso secondo la normativa UNI-EN 12697-26 , Geoconsultingitalia.
<https://geoconsultingitalia.com/modulo-di-rigidezza-conglomerato-bituminoso/>
- ^[38] Controllo Della Produzione, Verifica Delle Prestazioni E Predisposizione Di Norme Tecniche Di Capitolato Per Miscele Di Conglomerato Bituminoso Tipo Asphalt Rubber, Rapporto Finale, Prof. Ing. F. A. Santagata, Prof. Ing. F.Canestrari, Dr. Ing. E. Pasquini, Asphalt Rubber Italia, 2009.

-^[39] La resistenza alle deformazioni permanenti dei conglomerati bituminosi,
S. Grillini, E. Volta, Siteb, Rassegna del bitume 66/10.

[https://www.siteb.it/wp-
content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/6610_5.pdf](https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/6610_5.pdf)

-^[40] BS EN 12697-24:2018, BSI Standards Publication, 2018.