POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Influenza degli additivi rigeneranti sul comportamento meccanico del fresato bituminoso tramite l'adozione di sistemi modello



Relatore prof. Orazio Baglieri

Correlatori prof. Ezio Santagata prof. Davide Dalmazzo ing. Leonardo Urbano

> **Candidato** Andrea Carmelo Pavano

Anno accademico 2020-2021

A Roberta, Sorella amorevole. Ci manchi!

ABSTRACT

Il riciclaggio a caldo del fresato bituminoso, detto anche RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), sta diventando una pratica sempre più diffusa per massimizzare la sostenibilità ambientale e abbattere i costi di produzione delle nuove miscele bituminose. Al tempo stesso, è necessario condurre un minuzioso studio della miscela finale per tenere in considerazione gli impatti negativi connessi all'apporto di bitume invecchiato proveniente dal RAP.

Tali impatti negati possono essere controbilanciati per mezzo di particolari additivi, chiamati Attivanti Chimici Funzionali o additivi rigeneranti (dall'inglese rejuvenators) che hanno il compito di rigenerare il bitume contenuto nel RAP, riportando il bilancio tra asfalteni e maltenti verso una condizione di bitume non invecchiato, ristabilendone la giusta proporzione al suo interno.

Al momento, non esiste una normativa di riferimento attraverso il quale indagare l'efficacia di detti additivi e individuare le differenti proprietà in termini di effetto rigenerante. Gli studi disponibili in letteratura prevedono due distinti approcci: estrazione del bitume RAP tramite solventi e addizione del rigenerante o analisi diretta del conglomerato bituminoso contenente fresato rigenerato. Sebbene entrambi gli approcci abbiano ampia diffusione e comprovata validità, ci sono da sottolineare alcuni svantaggi: l'estrazione tramite solventi può danneggiare il bitume estratto e l'analisi diretta delle miscele bituminoso può essere onerosa in termini di tempo e strumenti di analisi.

Per ovviare a tali svantaggi, attraverso precedenti ricerche condotte nel Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino, è stato introdotto un nuovo strumento con il quale indagare l'efficacia dei rejuvenators. Tale strumento è il "sistema modello" per mezzo del quale si vuole mettere in evidenza la risposta della fase legante rigenerata, operando direttamente sul fresato bituminoso. Da tener presente che questo approccio non sostituisce in alcun modo miscele bituminose formate da 100% RAP. Il sistema modello è costituito da una struttura "quasi" monogranulare di fresato 5/8, successivamente condizionato con diversi rejuvenators. Inoltre, si costruisce il sistema modello di confronto miscelando gli aggregati estratti dal RAP con bitume vergine. Tutti i sistemi modello sono caratterizzati dalla stessa struttura litica e volumetria, controllata per mezzo del parametro Voids in Mineral Aggregates. Tenendo fissa la struttura litica e massimizzando il valore di VMA, si assume che la risposta meccanica

dei diversi sistemi modello sia maggiormente influenzata dalla risposta della fase legante.

Pertanto, nel presente lavoro di tesi, si prosegue l'indagine sperimentale già in corso, analizzando la sensibilità alle variazioni di dosaggio dei rejuvenators, la risposta nei confronti delle sollecitazioni cicliche e a bassa temperatura. Si vuole continuare, quindi, con la validazione dello strumento sistema modello e definire come i rejuvenators interagiscono col bitume RAP.

ABSTRACT
SOMMARIO
1 INTRODUZIONE 1
1.1 Obiettivi
2 STATO DELL'ARTE4
2.1 RAP
2.2 RIGENERANTI
2.3 STRUMENTI PER TESTARE L'EFFICACIA DEI RIGENERANTI9
2.4 INQUADRAMENTO DEL SISTEMA MODELLO12
3 MATERIALI14
3.1 RAP14
3.1.1 GRANULOMETRIA16
3.1.2 CONTENUTO DI BITUME19
3.1.3 MASSIMA MASSA VOLUMICA TEORICA20
3.1.4 MASSA VOLUMICA APPARENTE22
3.2 RIGENERANTE E e P24
3.3 BITUME 50-7024
4 SPERIMENTAZIONE
4.1 CONFEZIONAMENTO DELLE MISCELE
4.2 LAVORABILITA'
4.3 COMPATTAZIONE DEI CAMPIONI

SOMMARIO

5 METODI DI INDAGINE
5.1 ITSM (INDIRECT TENSILE STRENGHT MODULUS)
5.2 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA
5.3 PROVE DI MODULO DINAMICO E*
5.4 PROVE DI TRAZIONE MONOASSIALE DIRETTA CICLICA41
6 ANALISI DEI RISULTATI44
6.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA LAVORABILITA'44
6.2 MODULO ELASTICO (ITSM)49
6.3 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA
6.4 CURVE MAESTRE E DOSAGGIO OTTIMALE55
6.5 PROVE DI TRAZIONE MONOASSIALE DIRETTA CICLICA59
7 CONCLUSIONI
8 BIBLIOGRAFIA

1 INTRODUZIONE

Il fresato bituminoso (detto anche RAP – Reclaimed Asphalt Pavement) è il materiale risultante dalla fresatura o dalla demolizione di pavimentazioni in conglomerato bituminoso a fine vita utile e dallo scarto di produzione in impianto. Esso è costituito generalmente da aggregati e bitume, quest'ultimo con proprietà reologiche e meccaniche totalmente differenti dal bitume vergine.

Nella fase di mix design di nuovi conglomerati bituminosi, è necessario prestare particolare attenzione alla tipologia e al dosaggio di fresato bituminoso. Infatti, avendo al suo interno un legante bituminoso eccessivamente invecchiato, l'apporto di elevate quantità di RAP nella miscela "fresca" genera un sostanziale irrigidimento del materiale, con possibili ripercussioni sulle performance meccaniche della pavimentazione durante la vita di servizio.

Qualora si voglia massimizzare (anche oltre il 50%) il riciclaggio di RAP nei nuovi conglomerati bituminosi, è necessario rigenerare il bitume invecchiato in esso contenuto per mezzo di additivi rigeneranti (conosciuti nella letteratura di settore come "rejuvenators"). L'obiettivo di tali additivi è quello di ripristinare le caratteristiche chimiche e reologiche del bitume invecchiato, riportandolo verso una condizione tale da garantire prestazioni simili a quelle di un bitume vergine. Entrando più nel dettaglio, i rejuvenators hanno il compito di riportare il bilancio tra asfalteni e maltenti verso una condizione di bitume non invecchiato, ristabilendone la giusta proporzione al suo interno.

L'esperienza scientifica consolidata nel corso degli anni ha evidenziato, anche attraverso sperimentazioni reali, la necessità di integrare i rejuvenators all'interno di conglomerati bituminosi contenenti elevate quantità di fresato. Nelle fasi di studio delle miscele è, quindi, indispensabile valutare attentamente l'efficacia di questi additivi, definendo il corretto dosaggio e la risposta finale del legante rigenerato e, di conseguenza, della miscela finale.

L'efficacia dei rejuvenator è, per l'appunto, un aspetto cruciale da tenere in considerazione. Gli approcci principalmente adottati per tale scopo riguardano studi chimici e reologici del bitume estratto dal RAP per mezzo di solventi o l'analisi diretta della miscela bituminosa contenente fresato rigenerato. I due metodi appena menzionati, se da un lato hanno un'esperienza consolidata e un approccio molto diretto al problema,

portano alcune controindicazioni da tenere bene in considerazione. Infatti, l'utilizzo dei solventi comporta delle alterazioni del bitume che molto probabilmente non rifletterà le effettive caratteristiche del bitume contenuto nel RAP. Al tempo stesso, i solventi sono tossici e non di facile impiego nei laboratori. Operando, invece, direttamente sul conglomerato bituminoso, sebbene si sviluppi un'analisi che tende a riprodurre molto più fedelmente quello che avviene nella realtà, comporta molto spesso tecniche e metodi di indagine onerosi.

Per svincolarsi dalle precedenti problematiche, fermo restando la validità dei metodi sopra esposti come discusso in letteratura, con questo lavoro di tesi si vuole investigare l'efficacia degli additivi rigeneranti per mezzo del cosiddetto "sistema modello".

Il sistema modello è lo strumento sviluppato nel corso di precedenti sperimentazioni con il quale si vuole indagare la risposta del legante rigenerato operando direttamente sul fresato bituminoso. Da tenere in considerazione che il sistema modello non riproduce in nessun modo miscele bituminose formate da 100% RAP.

Il sistema modello è composto da fresato bituminoso con una composizione "quasi mono-granulare". Infatti, si è adottata la classe 5/8 in modo da produrre una struttura litica quanto più possibile costante, condizione che difficilmente potrebbe essere raggiunta se fossero impiegati classi superiori caratterizzate dalla presenza di agglomerati. Inoltre, non sono state considerate classi granulometriche inferiori per evitare la presenza di eccessiva frazione fine e per garantire comunque una certa struttura ai campioni durante le prove meccaniche.

Definita la granulometria di progetto, si è fissata un parametro volumetrico di riferimento per tutti i sistemi modello, in modo che tutti i campioni avessero gli stessi punti di contatto tra i grani, indipendentemente dalla presenza o meno di rejuvenators. Tale parametro è il Voids in Mineral Aggregates (VMA), tenuto sempre costante e pari al 30 %.

In questo modo, come anticipato, avendo sempre la stessa struttura litica e ipotizzando che tutti i sistemi modello abbiano gli stessi punti di contatto (VMA), si ipotizza che la risposta del sistema modello sia maggiormente influenzata dalla fase legante, minimizzando il contributo dello scheletro litico.

1.1 OBIETTIVI

Il presente lavoro di tesi si inquadra in una sperimentazione già avviata in cui si prevede l'adozione del sistema modello per studiare l'efficacia degli additivi rigeneranti del fresato bituminoso. Sono stati costituiti quattro differenti sistemi modello:

- sistema modello RAP, formato da 100 % RAP;

- sistema modello RAP + rejuvenator E;

- sistema modello RAP + rejuvenator P;

- sistema modello Bianco, formato dagli aggregati estratti dal sistema modello RAP miscelati con bitume vergine 50/70.

Quest'ultimo sistema modello è stato introdotto come condizione di riferimento per valutare l'azione rigenerante gli additivi E e P.

Innanzitutto, si è definito un metodo per la definizione del dosaggio ottimale. Come è risaputo, il dosaggio influenza notevolmente la risposta del bitume rigenerato. Un quantitativo troppo basso o troppo elevato non rigenera effettivamente il bitume o esercita un'esagerata azione di softening, rispettivamente.

Stabilito il dosaggio ottimale, si è analizzata l'efficacia degli additivi rigenerati osservando la risposta dei diversi sistemi modello nei riguardi di sollecitazioni di trazione diretta monoassiale ciclica e rottura a basse temperature.

L'obiettivo finale è quello di valutare come si sviluppa l'azione rigenerante e se è possibile definire un ranking tra gli additivi considerati.

In base anche ai risultati acquisiti in precedenti sperimentazioni, si è anche voluto indagare se la caratterizzazione meccaniche eseguita con metodologie di prova avanzata possono essere comparabili con approcci meno onerosi e più speditivi. Quindi, si è analizzata la risposta viscoelastica in campo lineare investigata con prove di modulo dinamico e prove di modulo elastico in configurazione di trazione indiretta.

Inoltre, un confronto è stato portato avanti per capire che influenza ha la temperatura di prova sull'analisi dell'efficacia dei rejuvenators eseguendo test di resistenza a trazione indiretta.

In ultimo, dall'interpretazione della risposta viscoelastica in campo lineare, si è dedotta l'influenza della struttura litica sul modulo dinamico $|E^*|$.

2 STATO DELL'ARTE

In questo capitolo verrà intrapresa una revisione della letteratura esistente sui materiali oggetto di analisi in tale studio, ovvero il RAP e i rigeneranti.

La promozione di una corretta gestione del fresato e la sua valorizzazione mediante tecniche di riciclo, atte a garantirne il reinserimento nel settore delle costruzioni stradali, oltre a essere vantaggioso per gli operatori del settore, diviene ormai indispensabile per le pubbliche amministrazioni e gli enti locali che mirano al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità e di economia circolare.

La pubblica amministrazione e i gestori della rete stradale hanno quindi indirizzato uno studio per caratterizzare ed ottimizzare le caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi contenenti il RAP.

2.1 RAP

In questa analisi, l'attenzione è stata rivolta al fresato bituminoso anche indicato come Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), ovvero il materiale risultante dalla scarifica (demolizione profonda in blocchi) o fresatura (rimozione superficiale mediante fresa) delle pavimentazioni stradali a fine vita. Il fresato rientra quindi nella categoria dei rifiuti da costruzione e demolizione ed è di norma identificato come rifiuto non pericoloso con il codice CER 170302 (miscele bituminose non contenenti catrame di carbone).

La norma UNI-EN 13108-8 definisce il fresato d'asfalto: "Conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura degli strati del rivestimento stradale che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo".

In pratica è una miscela di inerti con una precisa curva granulometrica caratterizzata da una elevata presenza di fini prodotti dall'effetto "taglio" del tamburo fresante sugli inerti. Il legante, ancora presente nel RAP è bitume invecchiato. Un bitume quindi, almeno sullo strato superficiale, molto più viscoso, "duro" che ha perso in parte la duttilità e l'elasticità che lo caratterizzavano allorquando veniva posto in opera. L'invecchiamento della fase legante presente nel RAP è stato associato a sei meccanismi principali (Roberts et al. 1996; Tyrion 2000; Karlsson e Isacsson 2006):

- Ossidazione per reazione diffusiva tra il legante e l'ossigeno presente nell'aria;
- Volatilizzazione per evaporazione dei componenti più leggeri soprattutto durante costruzione;

- Polimerizzazione tramite reazione chimica di componenti molecolari;
- Tixotropia dovuta alla formazione di una struttura all'interno del legante bituminoso per lungo tempo periodo di tempo;
- Sineresi dovuta all'essudazione di sottili componenti oleose; e
- Separazione mediante rimozione di costituenti oleosi, resine e asfalteni mediante aggregati assorbenti.

Poiché il legante del RAP reagisce e perde alcuni dei suoi componenti durante il processo di invecchiamento, il suo comportamento reologico sarà naturalmente diverso dai materiali vergini. Ciò suggerisce l'importanza di controllare il processo di miscelazione tra leganti riciclati e vergini poiché la percentuale di bitume inertizzata non è comodamente identificabile all'interno della miscela. Uno scorretto utilizzo del RAP all'interno della miscela può provocare l'insorgenza di precoci fenomeni di degrado delle pavimentazioni.

Il livello di miscelazione influisce sia sulle prestazioni dell'HMA prodotto che sulla competitività economica del processo di riciclaggio.

A tal riguardo vi sono diverse teorie che interpretano il comportamento reale del bitume contenuto nel RAP e conseguentemente del RAP stesso:

1. Black Rock: il materiale si comporta come un aggregato poiché il film di bitume che ricopre gli aggregati del fresato bituminoso ossidato risulta essere interamente inertizzato;

2. Partial Blending: parte del bitume invecchiato che riveste gli aggregati del RAP si miscela con il legante vergine ottenendo una pellicola di bitume che possiede caratteristiche meccaniche che variano con continuità da quelle del bitume vergine a quelle del bitume invecchiato, muovendosi dall' esterno verso l'interno. La frazione di bitume ossidato che non si lega si comporterà da inerte.

3. Total Blending: il legante vergine si miscela interamente con il bitume ossidato del RAP, la fase legante che deriva dalla totale miscelazione avrà ovunque delle caratteristiche meccaniche uniformi;

Il concetto di partial blending viene mostrato nella figura seguente (Development of Laboratory Mix Design for RAP MIXES-Burns Cooley Dennis, INC.).



Figura 2.1: Schema della diffusione del RAP all'interno della miscela

La teoria più corretta che descrive il comportamento del RAP nelle miscele bituminose di nuova realizzazione, come giustificato da numerosi studi, risulta essere quella del "Partial Blending".

I benefici che si hanno grazie all'uso del RAP sono molteplici e universalmente riconosciuti e possono essere riassunti come segue:

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

Secondo il punto di vista economico, in letteratura esiste uno studio condotto da Zaumanis nel 2014, il quale afferma che il costo stimato per tonnellata di conglomerato bituminoso prodotto utilizzando Il RAP, in percentuale variabile tra 0 e 100, segua l'andamento riportato in figura 2.1. In questa figura, si evince come varia il costo del conglomerato bituminoso variando la percentuale di RAP contenuta al suo interno.



Figura 2.2: Costo del conglomerato bituminoso al crescere della percentuale di RAP

Come si evince il costo di conglomerati, prodotti con tecniche a caldo, subisce un decremento del 50/70 % rispetto ad un materiale composto da soli materiali vergini. La maggior parte dei costi, come è risaputo, deriva dal costo del bitume, infatti sempre Zaumanis nel 2004, ha quantificato un incremento del prezzo del bitume virgine dal 1990 al 2015 pari al 700%.

Il fresato bituminoso può essere recuperato (riciclato) in diversi modi:

- in situ (sul posto);
- in impianto fisso (stabilimento di produzione);
- a caldo (utilizzando energia termica per essiccare gli inerti);
- a freddo (senza energia termica ma a temperatura ambiente con l'ausilio di emulsione o bitume schiumato);
- a tiepido (o "a bassa temperatura" via di mezzo tra le due precedenti che consente un discreto risparmio energetico).

Le due tecnologie più utilizzate rimangono comunque quelle a caldo in impianto fisso ed a freddo in situ. Anche se la tecnologia del recupero a caldo in impianto fisso è quella nettamente prevalente, il recupero a freddo in situ è in realtà quella che produce i maggiori vantaggi economici e ambientali.

2.2 Rigeneranti

Per affrontare la problematica del legante ossidato presente nel RAP vengono utilizzati degli agenti rigeneranti al fine di ripristinarne le proprietà reologiche del legante (Sondag et al. 2002). Gli agenti ringiovanenti sono costituiti da oli lubrificanti e diluenti, che contengono un'elevata percentuale di costituenti del maltene (Terrel e Epps 1989). Come notato nel precedente paragrafo, il bitume del RAP perde molti dei suoi componenti oleosi durante la sua vita utile, determinando così uno sbilanciamento del rapporto malteni-asfalteni, che porta ad una maggiore rigidità e viscosità del legante e ad una minore duttilità.

Per mezzo della reintroduzione di diversi gruppi funzionali, precedentemente dispersi a causa dell'invecchiamento, si riesce ad ottenere la rigenerazione della fase legante ossidata, invertendo quel processo di invecchiamento che ha causato la riduzione del rapporto malteni-asfalteni all'interno della miscela.

Una considerazione importante nella selezione dell'agente ringiovanente è che deve essere compatibile con il legante invecchiato. Gli agenti ringiovanenti con un basso contenuto di saturazione e un alto contenuto aromatico sono generalmente compatibili con il legante invecchiato (Dunning e Mendenhall 1978).

La diffusione completa del rigenerante nel bitume del RAP è difficile da ottenere e questo può contribuire a proprietà e distribuzione non uniformi nella miscela riciclata. Secondo Carpenter, il processo di diffusione di un rigenerante comprende quattro fasi. Nella prima fase, il rigenerante forma una pellicola a bassa viscosità che circonda le particelle di aggregato rivestite con legante ossidato.

Nella seconda fase inizia a penetrare nel legante invecchiato e "ammorbidisce" il legante. Nella terza fase, il ringiovanente penetra nel legante invecchiato e le viscosità degli strati interni ed esterni vengono gradualmente ridotte. Infine, nella quarta fase col passare del tempo, si raggiunge l'equilibrio sulla maggior parte della pellicola di legante invecchiato.

L'azione rigenerante ottimale dei rigeneranti, quindi, si sviluppa nel tempo, attraverso la diffusione nel film di legante ossidato e la dispersione omogenea in ogni parte sua parte. Il risultato finale dipenderà molto dal dosaggio di rejuvenator introdotto nella miscela e l'idoneità del prodotto utilizzato.

Come affermato da Baghaee Moghaddam e Baaj nel 2016, diversi fattori potrebbero influenzare la velocità di diffusione del rigenerante, come elencato in seguito:

- Dimensioni e forma di molecole o agglomerati;
- Forze intermolecolari;
- Temperatura;
- Rigidità strutturale delle molecole diffondenti;
- Struttura microscopica di una fase relativamente stazionaria, se esiste.

È di particolare interesse vedere come agiscono i rigeneranti ripristinando lo stato originario dell'arte, come evidenziato nella figura seguente. In particolare, mostra la composizione del legante in percentuale (Martins Zaumanis, 2014).



Figura 2.3: Stato del Legante in funzione dell'invecchiamento (Zaumanis, 2014)

2.3 STRUMENTI PER TESTARE L'EFFICACIA DEI RIGENERANTI

In letteratura esistono vari metodi per interpretare l'efficacia dei rigeneranti nei conglomerati bituminosi costituiti da RAP.

L'efficacia dei ringiovanenti viene solitamente valutata analizzando direttamente le prestazioni di miscele contenenti RAP, oppure valutando le proprietà reologiche dei leganti estratti dalle miscele mediante solventi.

In questi casi, gli effetti reali dei rigeneranti sono parzialmente sovrapposti o con gli effetti dovuti al mix, come l'aggregazione dei grani dello scheletro litico, o con gli effetti derivanti dall'uso di solventi (presenza di residui sconosciuti all'interno della matrice legante).

Gli svantaggi per entrambi i metodi riguardano il fatto che non riescono a determinare le peculiari differenze derivanti dall'uso di diversi rigeneranti, i quali possono diffondersi diversamente all'interno della miscela attraverso il film di legante ossidato, influenzando le caratteristiche reologiche ed il tipo di legame costituito.

In letteratura, vi sono determinati studi che trattano dell'estrazione del bitume ossidato del RAP.

I vantaggi di tale trattazione consistono nella effettiva estrazione del bitume, mediante l'utilizzo di solventi, il quale permette di caratterizzare il bitume ossidato contenuto nel RAP e di determinarne le proprietà chimico-fisiche. La conoscenza di tali proprietà è possibile solo tramite questa procedura, infatti su una miscela di RAP reale generica le caratteristiche del legante ossidato rimangono incognite.

Lo svantaggio di tale metodo consiste nella parziale degradazione del bitume ad opera dei solventi stessi, i quali reagiscono con il bitume ossidato, modificandone parzialmente le caratteristiche iniziali.

Uno studio ha confrontato il comportamento di un bitume PG 40-50 miscelato con tre diversi rigeneranti rispetto a un bitume target PG 70-100 (Aybike Ongel e Martin Hugener, 2015) mediante test sul punto di rammollimento, la penetrazione e il modulo complesso G*.

I test sono stati condotti a tre gradi di invecchiamento:

- bitume vergine,
- bitume invecchiato tramite RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)
- RTFOT combinato con il PAV (Pressure Aging Vessel).

Il risultato che deriva da questo studio riguarda l'effettiva riuscita nell'ottenimento delle caratteristiche reologiche del bitume vergine target rendendo così possibile l'utilizzo di RAP nella miscela.

Uno studio molto interessante a riguardo risulta essere quello di Zaumanis del 2014, dove sono stati valutati gli effetti di sei diversi rigeneranti (tallolo, olio esausto, grasso vegetale, olio vegetale e olio organico, olio di motore esausto) sulle proprietà del RAP.

Gli esperimenti sono stati condotti su quattro diversi campioni di materiale costituiti da:

- 1. 100% RAP e 12% di rigenerante rispetto alla massa totale di legante;
- 2. Campione con aggregati estratti di 9.5 mm per mezzo di forno ad ignizione e successivamente miscelati con il 5.94% di bitume vergine PG 64-22;
- Campione dalla quale sono state valutate le proprietà del bitume estratto dal RAP e miscelato con il 12% di rigenerante;
- 4. Campione di confronto composto da bitume PG 64-22.

Quindi come si evince, sono stati svolti numerosi test, sia di tipo reologico sul bitume ossidato e rigenerato estratto dal RAP, che test su miscele reali composte da 100% RAP e 12% di rigenerante.





Figura 2.4: Sperimentazione di Zaumanis, 2014

Sulle miscele reali sono stati eseguiti i seguenti test:

- Rottura per effetti termici (thermal stress restrained specimen test TSRST);
- test di resistenza all'ormaiamento (Hamburg wheel tracking test);
- prova di creep;
- test di resistenza a trazione indiretta
- test di taglio in configurazione coassiale (CAST).

Mentre sul bitume estratto dal RAP sono stati svolti test del tipo:

- Dynamic shear rheometer (DSR), per la determinazione della risposta alle alte temperature;
- Bending beam rheometer (BBR), per la determinazione della resistenza alle basse temperature
- Dynamic shear rheometer (DSR), per la determinazione del modulo complesso G* e dell'angolo di fase δ alle temperature intermedie (25 °C)

Dallo studio si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Cinque dei sei rigeneranti testati con dosaggio al 12% hanno assicurato la corrispondenza al PG 64-22.
- Gli additivi organici si sono dimostrati più efficienti dei prodotti petroliferi, nel ridurre il PG.
- Il valore alto (64) del PG, per tutti i campioni rigenerati è rimasto al di sopra di quello del legante vergine, ciò indica una maggiore resistenza alle deformazioni permanenti.
- I risultati dei test di cracking sulla miscela alle basse temperature hanno mostrato che cinque dei sei rigeneranti hanno una ridotta suscettibilità al cracking rispetto alla miscela RAP.
- La resistenza a fatica dei campioni rigenerati secondo i parametri di prova

utilizzati risulta superiore a quella della miscela vergine per tutti i campioni tranne per il campione rigenerato con il WEO (wasted engine oil).

2.4 INQUADRAMENTO DEL SISTEMA MODELLO

L'esigenza di interpretare al meglio l'efficacia dei rigeneranti nel RAP ha posto le basi per la definizione di un nuovo strumento, definito Sistema Modello.

Sperimentalmente, si può definire il SISTEMA MODELLO come un sistema accuratamente progettato con il quale indagare particolari fenomeni fisico-meccanici, presupponendo che le acquisizioni sperimentali ottenute possano fornire indicazioni sul comportamento reale del film di bitume invecchiato quando interagisce con gli additivi rigeneranti.

I rigeneranti hanno diversa natura e composizione chimica per cui è essenziale cercare di interpretare al meglio la loro diffusione attraverso il film di bitume ossidato presente nel RAP, poiché ne influenza le caratteristiche reologiche.

In particolare, questo nuovo metodo viene utilizzato per mettere in evidenza le differenti caratteristiche dei diversi rigeneranti interagenti con miscele costituite da 100% RAP. Si sfrutta, infatti, il concetto di sistema modello per ridurre al minimo le incertezze legate alla composizione granulometrica del materiale, forma e dimensione degli aggregati, tipo e quantità di bitume invecchiato del RAP.

Ciò permette di evidenziare il comportamento del legante rispetto a quello dello scheletro litico, così da poter valutare l'effetto degli additivi rigeneranti e del bitume vergine di aggiunta al RAP.

Il sistema modello è pensato in modo tale da poter confezionare dei campioni di RAP aventi scheletro litico sempre identico, con un fissato numero di punti di contatto per unità di volume tra i grani.

Il parametro che consente di descrivere quanto appena detto è la VMA (Voids in Mineral Aggregates), la quale viene posta costante al valore target del 30 %. Tale valore deriva da prove preliminari di compattazione effettuate alla stessa temperatura, con la conseguente individuazione della quantità di materiale necessaria per la preparazione dei provini finali.



Figura 2.5: struttura del sistema modello (a); distribuzione delle fasi

Per la costruzione del sistema modello è stata estratta dal cumulo di RAP la frazione granulometrica 5/8 per ottenere un sistema quasi costituito dalla medesima frazione (monogranulare).

Ciò permette di avere un minor numero di punti di contatto tra i grani del RAP e contemporaneamente una percentuale di vuoti maggiore, e quindi mettere maggiormente in luce il comportamento del legante.

Nello studio condotto da Dalmazzo, Urbano, Riviera e Santagata, mediante l'utilizzo di prove ITSM (indirect tensile stiffness moduli) e prove ITS (indirect tensile strength), svolte in diversi tempi di maturazione, si evince che dai risultati ottenuti l'approccio proposto risulta essere promettente.

In particolare, senza alterare la struttura e la composizione del legante ossidato del RAP mediante l'utilizzo di solventi, consente di valutarne la risposta sotto carico.

3 MATERIALI

Prima di procedere alla sperimentazione risulta di estrema importanza conoscere la composizione e quindi le caratteristiche dei materiali oggetto di studio. In questo capitolo verranno, quindi, analizzate tutte le caratteristiche dei materiali che sono stati impiegati durante la fase sperimentale e le prove di laboratorio relative a tale scopo, in modo da conoscere al meglio tutti gli aspetti e le proprietà inerenti ai materiali che si stanno utilizzando e poter procedere alla fase successiva della sperimentazione in modo consapevole.

In particolare, la prima parte della caratterizzazione andrà a valutare la distribuzione granulometrica del RAP (curva "nera") e degli aggregati estratti (curva "bianca"), il quantitativo di bitume e la massima massa volumica teorica (MMVT) del RAP, la massa volumica apparente degli aggregati (MVA).

Successivamente verranno caratterizzati i materiali compattati, andando a valutarne le curve di lavorabilità e la VMA (voids in mineral aggregate).

3.1 RAP

Come già detto in precedenza nel capitolo 2, il RAP è un materiale di riciclo derivante dalla scarifica e frantumazione di pavimentazioni degradate, composto da aggregati e bitume ossidato.

In particolare, in questo studio sono state utilizzate tre forniture di RAP. La prima analizzata in una precedente sperimentazione, mentre la seconda e la terza caratterizzate in questo studio. Tutte e tre le forniture provengono dall'impianto SITALFA, locato in Salbertrand, e derivano dalla demolizione della pavimentazione autostradale A32.

In funzione dell'elevata variabilità del materiale, il primo passo della caratterizzazione consiste nel valutare il fresato tal quale proveniente dall'impianto, che possiede una grande varietà di pezzature al suo interno, a partire dal filler fino ad arrivare a cluster delle dimensioni di 20 cm. Per questo motivo sono stati raccolti dei campioni di fresato tal quale per essere poi analizzati.



Figura 3.1: Cumulo di RAP tal quale

Per la costruzione del sistema modello la frazione granulometrica di interesse è la 5/8 per cui è stata operata una prima vagliatura in loco del materiale tal quale mediante due reti metalliche a maglia quadrata di opportuno diametro in modo da non avere eccessivo scarto. Successivamente, è stato necessario essiccare il materiale fino al raggiungimento di massa costante. A questo punto, mediante l'utilizzo di un set di setacci a maglia quadrata del diametro di interesse, è stata estratta la frazione granulometrica 5/8, raccogliendo per ogni operazione di vagliatura il passante al setaccio di maglia 8 mm ed il trattenuto al setaccio di maglia 5 mm.



Figura 3.2: Estrazione della frazione d'interesse e set di setacci utilizzati

Per ridurre il materiale alla quantità voluta, senza comprometterne l'omogeneità e la rappresentatività, seguendo la normativa UNI EN 932/1, è stato adottato il metodo della **quartatura**, ed in particolare utilizzando uno strumento dotato di secchio caricatore e scomparti raccoglitori, detto il quartatore di Jones.



Figura 3.3: Quartatore di Jones

Una volta ottenuta la frazione granulometrica di interesse è stata valutata la:

- Granulometria del RAP e degli aggregati estratti, tramite setacciatura;
- Il contenuto di bitume, per mezzo di un forno ad ignizione;
- Massima massa volumica teorica del RAP;
- Massa volumica apparente degli aggregati estratti, tramite metodi volumetrici con picnometri.

3.1.1 GRANULOMETRIA

Per la determinazione della distribuzione granulometrica si fa riferimento alla norma UNI EN 12697-2. La norma descrive un procedimento per la determinazione della granulometria degli aggregati di miscele bituminose mediante setacciatura. I setacci metallici a maglia quadrata impiegati per tale operazione di dimensione 8 mm;

6.3 mm; 5.6 mm; 5 mm; 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0.5 mm; 0.25 mm; 0.125 mm; 0.063 mm; fondello, in accordo alla norma UNI EN 13108-8.

La quantità di materiale utilizzato per svolgere la prova (due campioni da circa un kg ciascuno) viene scelto in funzione della granulometria del materiale, seguendo la norma UNI EN 12697-39. In seguito, è possibile procedere con il test, rabboccando il materiale in cima alla pila di setacci, i quali sono stati disposti ordinatamente in ordine decrescente.



Figura 3.4: Setacciatore elettromagnetico con pila di setacci

Impostato il tempo di prova di 10 minuti e settata l'intensità degli impulsi pari a 90, si può far partire la prova.

Così è stata determinata la distribuzione granulometrica del RAP tal quale e 5/8 (curve nere).

Per quanto riguarda la curva granulometrica degli aggregati estratti (curva bianca), la procedura risulta essere diversa rispetto a quella del RAP, in quanto vi sono alcuni passaggi da seguire, e sono:

- 1. Ignizione tramite forno ad elevate temperature del RAP per volatilizzare la pellicola di bitume che ricopre gli aggregati;
- 2. Lavaggio preventivo degli aggregati in modo tale da eliminare il filler, ovvero la porzione di materiale passante al setaccio da 0.063 mm. Il peso del filler verrà successivamente ricavato tramite differenza di pesate (pre e post lavaggio). Per il lavaggio sono stati utilizzati due stacci metallici di dimensioni 2 mm e 0.063 mm, come espresso dalla normativa UNI EN 933-1, e tale operazione procede fin tanto che l'acqua uscente dal setaccio più piccolo non risulti chiara e limpida;
- Essiccazione in stufa a 105 °C del materiale dopo il lavaggio, fino al raggiungimento di massa costante;
- 4. Setacciatura degli aggregati estratti dal forno con la medesima tecnica precedentemente esposta e calcolo della curva bianca.

In questo modo sono stata determinate le distribuzioni granulometriche degli aggregati estratti (curva bianca).



Grafico 3.1: Curva granulometrica "RAP tal quale" e "Aggregati estratti"



Grafico 3.2: Curve granulometriche "RAP 5/8" per le tre forniture



Grafico 3.3: Curve granulometriche "Aggregati estratti" per le tre forniture

Come si evince tra le tre forniture di materiare, pur essendo simili tra loro, vi sono delle differenze nelle pezzature che lo compongono.

In particolare, si nota che per il RAP le distribuzioni risultano piuttosto simili, mentre

per gli aggregati estratti si nota che la fornitura 3 sia costituita da aggregati, in percentuale, di dimensione maggiore. Infatti, gli indicatori rappresentanti la curva risultano essere localizzati più in basso rispetto ai corrispondenti delle altre due forniture.

3.1.2 CONTENUTO DI BITUME

Per ricavare il contenuto di legante percentuale all'interno dei campioni di RAP si utilizza il metodo dell'ignizione secondo la normativa UNI EN 12697-39. Per prima cosa bisogna disporre il materiale da caratterizzare, distribuito in modo omogeneo, all'interno di un cestello metallico formato da due scompartimenti, impilati uno sull'altro. In seguito, non appena il forno abbia raggiunto la temperatura di prova, 540 °C, viene inserito il cestello all'interno del forno, facendo attenzione della corretta disposizione al suo interno, impostato il peso di materiale da caratterizzare sul display dello strumento e dare il via al processo di combustione.

Tale forno ad ignizione è dotato di un sistema di monitoraggio del peso, infatti, una volta raggiunto un valore costante la prova viene interrotta e da ciò ne deriva che il bitume sia stato completamente estratto.



Figura 3.5: Forno ad ignizione (Carbolite).

Terminata la combustione, si estrae il cestello dal forno e lo si lascia raffreddare e si procede alla pesatura degli aggregati estratti.

Quindi tramite differenze di peso tra il campione iniziale e finale (dopo estrazione), si riesce ad ottenere il quantitativo di bitume presente sia per la miscela che per gli aggregati.

	(Net Wante – Net W post)
%D KAP -	Net W ante
0/P agg =	(Net Wante – Net W post)
%о agg —	Net W post

In seguito, si riportano i risultati ottenuti:

Tabella 3.1: Valori del contenuto di bitume per il RAP tal quale e le tre forniture

Fornit	ura 1	Fornitura 2		Fornitura 3	
%B _{RAP}	%B _{Agg}	%B _{RAP}	%B _{Agg}	%B _{RAP}	%B _{Agg}
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4.17	4.36	4.27	4.46	4.27	4.47

3.1.3 MASSIMA MASSA VOLUMICA TEORICA



Figura 3.6: caratteristiche volumetriche di un campione di miscela bituminosa

Il conglomerato bituminoso è composto da aggregati, bitume (in parte è assorbito dagli aggregati, in parte è legante effettivo) e vuoti d'aria. L'analisi volumetrica del conglomerato bituminoso permette di definire la percentuale in volume di ciascun componente per unità di volume di conglomerato. In particolare, è importante determinare il volume dei vuoti, che incide in maniera importante sulle proprietà meccaniche della miscela (ITS, rigidezza...).

La massima massa volumica teorica (MMVT) è definita come densità di una miscela bituminosa, su materiale sciolto, al netto dei vuoti d'aria, come espresso dalla normativa di riferimento, la UNI EN 12697-5.

In questo studio è stato utilizzato il metodo volumetrico.

Una volta calibrati i picnometri è stato possibile procedere alla determinazione della MMVT per campioni di RAP, Bianco e di RAP+Rigenerante E e RAP+Rigenerante P.



Figura 3.7: Sistema pompaggio a vuoto ed esempio della terza fase del metodo volumetrico

La formula per il calcolo della MMVT è la seguente:

$$\rho mv = \frac{(m1 - m2)}{1000 * Vp - (m3 - m2)/\rho w}$$

Dove:

- m1, m2, m3 sono le masse (in g);
- V_p è il volume del picnometro noto dalla calibrazione (in m³);
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua, anch'essa nota dalla calibrazione (in (kg/m³);
- ρ_{mv} è la massima massa volumica teorica (MMVT) in (kg/m³)

Successivamente si riportano i risultati ottenuti per la seconda fornitura:

R tal quale	kg/m²	2501
RII	kg/m³	2581
BII	kg/m³	2525
RII - E - 4	kg/m³	2579
RII - E - 8	kg/m³	2571
RII - E - 12	kg/m³	2560
RII - P - 4	kg/m³	2576
RII - P - 8	kg/m³	2574
RII - P - 12	kg/m³	2567

Tabella 3.2: Valori di MMVT

3.1.4 MASSA VOLUMICA APPARENTE

La norma di riferimento, la UNI EN 1097-6, propone la seguente definizione della massa volumica apparente: "rapporto tra la massa del campione di aggregato essiccato e il suo volume occupato in acqua, compreso ogni vuoto interno non accessibile ma esclusi i pori accessibili all'acqua".

In questa fase è stata utilizzata il metodo "saturo a superficie asciutta". La procedura per il calcolo della massa volumica apparente si basa su diverse procedure che sfruttano, ad ogni modo, la tecnologia dei picnometri. Una volta estratto il bitume dal RAP per mezzo di forno ad ignizione, si procede alla setacciatura del campione per poterne estrarre le tre frazioni granulometriche di interesse:

- filler (D<0.0063 mm);
- la frazione di 0.063 mm<D<4 mm;
- la frazione con D>4 mm.
 Ragioniamo adesso sulle singole frazioni granulometriche:
- 1. Filler:

la normativa di riferimento è la UNI EN 1097-7 (2008), e come fatto per la MMVT il primo passo consiste nella calibrazione dei picnometri per poterne ricavare il volume e la massa volumica dell'acqua contenuta al suo interno. I picnometri utilizzati in questa fase sono molto più piccoli (50ml) di quelli usati per le altre frazioni, poiché stiamo caratterizzando la frazione granulometrica più minuta.

L'equazione utilizzata per il calcolo della MVA del filler è la seguente:

$$\rho mv = \frac{(m1 - m0)}{1000 * Vp - (m2 - m1)/\rho w}$$

Dove:

m0, m1, m2, sono le masse, espresse in grammi;

V è il volume dei picnometri in millilitri;

 ρw è la massa volumica dell'acqua, in megagrammi al metro cubo;

 $\rho_{\rm f}$ è la massa volumica apparente del filler, in megagrammi al metro cubo.

	PICNOMETRO	m0	m1	m2	Т	ρ _w	Vp	ρ _f
	(-)	(g)	(g)	(g)	(°C)	(Mg/m ³)	(ml)	(Mg/m ³)
Prova 1	B+49	35.9	46	92.1	21.9	0.997867	49.82	2785.1
	367+367	26.8	36.9	84.7	21.9	0.997867	51.63	2709.8
Prova 2	B+49	35.9	45.9	92	21.9	0.997867	49.82	2757.6
	367+367	26.9	36.8	84.6	21.9	0.997867	51.63	2656.1

Tabella 3.3: Valori di MVA del filler.

Il valore medio ottenuto è: 2727 Mg/m³.

2. Frazione con 0.063mm <D< 4mm:

Per il calcolo della MVA di tale frazione granulometrica si fa riferimento alla normativa UNI EN 1097-6, regola l'utilizzo di materiale passante dalle maglie del setaccio da 4 mm e trattenuto al setaccio da 0.063 mm. Il campione dell'aggregato deve essere in conformità alla EN 932-1. Il campione va quindi lavato con stacci metallici da 4 mm e 0.063 mm in modo da rimuovere i grani più fini rimasti. La massa del campione di prova non deve essere minore di 300 grammi.

Al termine della prova è stato quindi possibile ricavare le masse volumiche (in Mg/m³):

Massa volumica apparente dei granuli (ρ_a),

$$\rho a = \rho w * \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)}$$

• Massa volumica dei granuli essiccati in stufa (ρ_{rd}),

$$\rho rd = \rho w * \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)}$$

• Massa volumica dei granuli in condizione satura a superficie asciutta (ρ_{ssd}),

$$\rho ssd = \rho w * \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)}$$

• L'assorbimento d'acqua dopo l'immersione per 24 ore (WA₂₄).

WA24 =
$$\frac{100 * (M1 - M4)}{M4}$$

Dove:

M1, M2, M3, M4, sono le masse, espresse in grammi;

V è il volume dei picnometri in millilitri;

 ρw è la massa volumica dell'acqua, in megagrammi al metro cubo.

ρa	$ ho_{rd}$	ρ _{rd} ρ _{ssd}	
(Mg/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g)
2.783	2.710	2.736	0.959

Tabella 3.4: Valori di MVA di aggregati dal diametro compreso tra 0.063 e 4 mm.

3. Frazione con D>4 mm:

La normativa di riferimento è ancora la UNI EN 1097-6. Il processo per la determinazione della massa volumica è quasi identico al precedente se non nella fase di valutazione della condizione satura a superficie secca degli aggregati, aventi pezzatura maggiore.

Per la determinazione della condizione SSA e quindi della massa (m1), bisogna trasferire su un panno asciutto la porzione di prova che si è lasciata scolare. Asciugare leggermente la superficie dell'aggregato posto sul panno e, quando il primo panno non sarà più in grado di asciugare, trasferire l'aggregato su un secondo panno assorbente. Spargere l'aggregato sul secondo panno in uno strato uniforme pari ad un solo granulo di aggregato e lasciarlo esposto all'aria lontano dai raggi solari diretti o fonti di calore fino a che ogni film visibile d'acqua sia scomparso, ma l'aggregato conservi ancora un aspetto umido.

ρ _a	$ ho_{rd}$	ρ_{ssd}	WA ₂₄
(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g)
2.752	2.652	2.688	1.371

Tabella 3.5: Valori di MVA di aggregati dal diametro maggiore di 4 mm.

3.2 RIGENERANTE E e P

I rejuvenators impigati nella presente sperimentazione sono stati forniti da aziende italiane e nelle tabelle che seguono si riportano le caratteristiche principali. Essendo al di fuori del programma sperimentale, nessuna analisi è stata condotta sui due additivi.

Rejuvenator	Origine	Densità (g/cm3)	Viscosità a 20°C (mPa S)	Flash point (°C)
Е	Miscela di oli idrocarburici paraffinici	0.88	40	>220

Tabella 3.6: scheda tecnica rigenerante E

Tabella 3.7: scheda tecnica rigenerante P

			Viscosità a	Flash point
Rejuvenator	Origine	Densità	20°C (mPa S)	(°C)
		(g/cm3)		
Р	Additivo non tossico	0.98	500	>150
	base vegetale			

3.4 BITUME 50/70

In questa sperimentazione è stato utilizzato anche un bitume vergine proveniente dall'impianto di produzione del conglomerato bituminoso di Salbertrand. Si tratta di un bitume tradizionale con classe di penetrazione 50/70, come mostrato nella seguente immagine.



Figura 3.8: Bitume 50/70

4. SPERIMENTAZIONE

Come più volte evidenziato nei precedenti capitoli, l'utilizzo del fresato bituminoso all'interno dei conglomerati richiede un minuzioso studio della miscela, poiché le caratteristiche meccaniche di quest'ultima sono molto condizionate dalla presenza del bitume invecchiato contenuto nel RAP.

In particolare, uno scorretto utilizzo del RAP nella miscela bituminosa può causare il prematuro insorgere di fenomeni di degrado, essenzialmente legati all'eccessiva rigidezza globale del conglomerato.

Per contrastare tali problematiche, si utilizzano quindi dei prodotti che hanno il compito di rigenerare il RAP andando ad invertire il processo di invecchiamento del bitume in esso contenuto.

Quindi una volta terminata la fase di caratterizzazione dei materiali utilizzati in questo studio, passiamo alla fase successiva, ovvero la sperimentazione stessa, avente come obbiettivo principale lo studio dell'interazione tra il bitume ossidato contenuto nel RAP e il rigenerante.

Per determinare le caratteristiche meccaniche dei campioni confezionati e poter così valutare sperimentalmente l'efficacia dei rigeneranti, sono stati effettuati dei test sui sistemi modello.

La sperimentazione si è focalizzata sulla realizzazione di prove per la determinazione delle curve maestra del modulo complesso, attraverso la quale indagare la risposta viscoelastica della fase legante e validare il dosaggio ottimale ottenuto per mezzo di prove ITSM, della resistenza a rottura per trazione indiretta alle basse temperature (ITS) e prove di trazione monoassiale diretta ciclica.

4.1 CONFEZIONAMENTO DELLE MISCELE

Avendo definito le caratteristiche del sistema modello e conoscendo le proprietà volumetriche dei materiali che lo costituiscono, trattate nel precedente capitolo, si procedere al confezionamento dei campioni che andremo poi a testare.

Per il confezionamento sono stati utilizzati i suddetti materiali:

- RAP di classe 5/8;
- Bitume vergine 50/70;
- Due diversi rigeneranti (E e P).

In funzione dei diversi test da effettuare e dalle normative di riferimento vengono compattati campioni aventi differente geometria ma caratteristiche volumetriche simili, imposte dal sistema modello.

Sono stati confezionati i seguenti campioni:

- RAP;
- RAP+ 4% RIGENERANTE E;
- RAP+ 8% RIGENERANTE E;
- RAP+ 12% RIGENERANTE E;
- RAP+ 4% RIGENERANTE P;
- RAP+ 8% RIGENERANTE P;
- RAP+ 12% RIGENERANTE P;
- Bianco.

con le seguenti caratteristiche:

- Massa di materiale definita in funzione della VMA target (30%);
- Compattazione ad altezza in fustella da 100 mm;
- Temperatura di miscelazione e compattazione (150 °C \pm 5°C).
- Quantitativo di rigenerante in funzione della percentuale in peso di bitume.

In seguito, viene mostrato come avviene il processo di miscelazione dei diversi campioni.

• Per i campioni di solo RAP si ha:

Definiti i parametri di miscelazione e compattazione, si procede con l'introduzione del materiale e delle fustelle all'interno di un forno ventilato alla temperatura selezionata. Una volta che il materiale ha raggiunto la temperatura desiderata, si procede a rabboccarlo all'interno di un miscelatore preriscaldato a 150 °C.



Figura 4.1: Miscelazione e controllo della temperatura

La miscelazione ha una durata di 5 min, il materiale miscelato viene inserito successivamente all'interno della fustella preriscaldata ed in seguito riposta nuovamente in forno per ulteriori 30 minuti, per evitare eventuali perdite di temperatura durante la fase di preparazione.

Passato questo tempo si procede con la compattazione

• Per i campioni di RAP + rigenerante E/P si ha:

Definito il dosaggio in percentuale di peso di bitume, si introducono i materiali all'interno del forno, raggiunta la temperatura opportuna, il materiale viene trasferito all'interno di una coppa riscaldata alla temperatura riferimento e si procede alla miscelazione per circa un minuto del solo RAP. Successivamente si introduce la metà del quantitativo di rigenerante e si procede al mix per un minuto. Trascorso questo minuto, si aggiunge la restante parte di rejuvenator e si miscela per un altro minuto. Infine, si miscela il RAP e tutto il rigenerante per altri 2 minuti. Il tempo di miscelazione complessivo è di 5 minuti. Dopo aver versato il materiale nella fustella, si ripone il tutto in stufa ventilata per 30 minuti. Trascorso questo tempo, si procede con la compattazione con pressa a taglio giratoria.

• Per i campioni di bianco:

Per confezionare campioni di bianco, in primo luogo, si rimuove il bitume invecchiato del RAP per mezzo della Carbolite. In seguito, una volta ottenuti gli aggregati estratti e la percentuale in peso di bitume persa, si procede con la preparazione del campione. Una volta che tutti i materiali in gioco, gli aggregati estratti ed il bitume vergine di classe 50/70, abbiano raggiunto la temperatura target all'interno del forno, si procede con la miscelazione all'interno della coppa.

Versati gli aggregati nella coppa e aggiunta la quantità di bitume vergine opportuna si procede con la miscelazione, che, come per gli altri campioni, avrà una durata di cinque minuti.

Al termine della miscelazione si procede alla compattazione come evidenziato negli altri casi.

4.2 LAVORABILITA'

La normativa di riferimento è la UNI EN 12697-31 ed esprime una procedura per la valutazione della lavorabilità dei materiali oggetto di analisi mediante compattazione con pressa a taglio giratoria.

La pressa a taglio giratorio consente di superare le limitazioni proprie della metodologia di costipamento Marshall, di tipo impulsivo unidirezionale, che attualmente è la più utilizzata nel settore stradale ed indicata nella maggior parte delle Norme Tecniche dei Capitolati. Nel caso della pressa giratoria viene consentita, infatti, la riorganizzazione dei granuli grazie all'applicazione di un'azione combinata di sollecitazioni normali e tangenziali che mutano continuamente di direzione a causa della rotazione eccentrica della fustella contenente il materiale e che simulano quindi più fedelmente le azioni dei mezzi di costipamento di cantiere.



Figura 4.2: Metodologie di costipamento impulsiva e giratoria

I parametri adottati per la compattazione in questo lavoro di tesi sono i seguenti:

- Pressione verticale uguale a 600 KPa;
- Angolo di rotazione dell'asse della fustella pari a 1.25 °;
- Compattazione "ad altezza" del campione fissata.



Figura 4.3: Pressa a taglio giratoria

I paramertri da tenere particolarmente in considerazione sono la temperatura di prova, la massa necessaria da utilizzare per la compattazione, come evidenziato anche dalla
normativa, e la VMA (voids in mineral aggregates), la quale è stata impostata al valore target del 30%.

Quest'ultimo parametro viene trattato dall'American society of civil engeeners nel capitolo 5 "Volumetric proprerties of compacted paving mixtures". In particolare, si ha bisogno, per il calcolo della VMA e conseguentemente della massa, del peso specifico Gsb dell'aggregato, inteso come il rapporto tra la massa secca in stufa di un volume unitario di aggregato (compresi i volumi dei vuoti impermeabili e permeabili all'acqua) e la massa dello stesso volume d'acqua. Per motivi pratici, nella presente sperimentazione si è assunto che Gsb=Gse, quindi la VMA è stata calcolata considerando il valore di Gse anziché Gsb. Per determinare la massa necessaria al raggiungimento delle caratteristiche volute

quindi si utilizzata la formula inversa per la determinazione della massa volumica:

$$M = \left(1 - \frac{VMA}{100}\right) * \left(\frac{Gse}{1 - \frac{B\%}{100}}\right) * V$$

Dove:

- VMA (voids in mineral aggregates) è posto pari al target del 30% (%);
- B% è la percentuale di bitume del RAP (%);
- V è il volume geometrico dato dalla moltiplicazione della superficie circolare del campione per la sua altezza (mm³);
- M è la massa del provino utile da inserire all'interno della fustella (Kg).

Al termine della compattazione, nota, quindi, la MMVT ed il volume geometrico, dato dal è possibile ricavare il valore percentuale di compattazione (C%) e conseguentemente il valore percentuale di vuoti presenti nel provino (v%).

Grazie a questi valori è stato quindi possibile costruire le curve di compattazione, infatti tramite questa procedura è stato possibile ottenere campioni che possono essere sottoposti alla valutazione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche.

Una volta estruso il campione dalla fustella, come mostrato in figura 3.19, lo si lascia raffreddare e successivamente si registra la massa effettiva e le dimensioni (diametro su due punti e altezza su 4 punti).



Figura 4.4: Campione compattato estruso

L'opportuna rielaborazione dei dati ha consentito quindi la costruzione delle curve di addensamento, rappresentanti la percentuale di compattazione dei provini al variare del numero di rotazioni effettuate dalla pressa in scala logaritmica. I parametri principali di tali curve sono:

- C1 (autoaddensamento): lettura del valore di addensamento relativo alla prima rotazione, esprime di fatto sul grafico l'intercetta;
- K (lavorabilità): esprime quanto, più o meno, un campione è lavorabile, graficamente indica la pendenza della curva di addensamento.

Questi parametri servono quindi per esprimere l'equazione della retta che descrive il comportamento del materiale durante la fase di compattazione.

$$C_{(n_G)} = C_1 + k \cdot \log(n_G)$$

Come esempio, riportiamo in basso la curva di addensamento, in ascissa vi è il logaritmo del numero di rotazioni ed in ordinata la percentuale di compattazione, di un campiono composto da solo RAP e la relativa equazione della retta.



Grafico 4.1: Curva di addensamento di un campione di RAP

In seguito, invece riportiamo i valori caratteristici ottenuti da tale curva.

Tabella 4.1: Valori caratteristici K e C1 di un campione di RAP

k	C1
9.06	63.4

4.3 COMPATTAZIONE DEI CAMPIONI

Per poter effettuare i test sono stati compattati diversi campioni con la pressa giratoria a taglio, come descritto nel paragrafo precedente.

I campioni utilizzati possono differire in dimensioni e tipo di fornitura di RAP ma manterranno proprietà volumetriche simili, imposte dal sistema modello.

Per le prove ITSM e ITS sono stati utilizzati campioni compattati ad altezza di 65 mm in fustelle da 100 mm, mentre per le prove di modulo dinamico e trazione mono assiale diretta ciclica sono stati utilizzati campioni compattati ad altezza di 130 mm in fustelle da 100 mm.



Figura 4.5: Esempio di campioni compattati da 130 mm e 65 mm di altezza

I campioni compattati oggetto di studio sono discriminati dalla seguente nomenclatura:

Rx - Ay - z

Dove:

- R indica il RAP;
- X indica la fornitura di RAP utilizzata;
- A esprime il tipo di rigenerante utilizzato (E o P);
- Y il numero del campione in esame;
- Z indica la percentuale di rigenerante utilizzata.

Nel capitolo riguardante l'analisi dei risultati verranno mostrate le caratteristiche volumetriche e le curve di compattazione ottenute per tutti i campioni in esame.

5 METODI DI INDAGINE

Le metodologie di indagine operate in tale studio, come già indicato nel paragrafo riguardante la sperimentazione, hanno il comune obiettivo finale di discriminare l'efficacia dei rigeneranti nei sistemi modello. Al tempo stesso, alcune delle prove elencate nel seguito, hanno permesso di eseguire un confronto tra le diverse forniture di fresato bituminoso col fine di evidenziare l'effetto della composizione granulometrica. Infine, si è visto se le prove eseguite con macchine e metodologie più performanti sono comparabili con strumenti e metodi di prova più speditivi comuni ai vari laboratori di prove sui materiali stradali.

Quindi, sono state svolte le seguenti prove:

- Prove di Modulo di rigidezza (ITSM) in configurazione di trazione indiretta eseguito con una macchina idraulica (UTM-30);
- Prove di Modulo dinamico (|E*|) in configurazione mono assiale e non confinato eseguito con una macchina idraulica (UTM-30);
- Prove in trazione mono assiale diretta ciclica, eseguita con una macchina idraulica (AMPT);
- Prove di resistenza a trazione indiretta (ITS).

5.1 ITSM (Indirect Tensile Strenght Modulus)

Questa prova, non distruttiva, permette di caratterizzare il modulo di rigidezza dei campioni compattati, in configurazione di trazione indiretta.

Il macchinario che è stato utilizzato per la realizzazione della prova è l'UTM-30. Tale strumento di prova di ultima generazione permette di operare a differenti temperature e tempi di picco.



Figura 5.1: configurazione di prova

Questa prova è stata inserita all'interno del programma sperimentale per cercare di monitorare l'andamento delle caratteristiche meccaniche al variare della percentuale di rigenerante utilizzata nel sistema modello. In funzione di tale analisi, è stato possibile definire un dosaggio ottimale di rigenerante, in modo da riportare i valori di E* caratteristici del RAP verso la condizione di riferimento.

Tale test è di tipo non distruttivo ed è stato eseguito su campioni di altezza 65 mm e diametro 100 mm in accordo con la normativa UNI EN 12967-26.

Il campione viene sottoposto ad un carico verticale attraverso l'attuatore della macchina, che ripartisce il carico, pulsante con specifici tempi di riposo, lungo le due generatrici opposte del campione.

Le deformazioni che si sviluppano per effetto del carico vengono lette da una coppia di trasduttori LVDT sul diametro orizzontale del campione. Questo comporta che nonostante il tipo di carico sia di compressione, le deformazioni sono distribuite lungo il piano verticale, e quindi di trazione.



Figura 5.2: Stato tensionale del campione durante il test

Le prove sono state condotte a tre temperature (4°C, 20°C, 40°C) e tre tempi di picco (60 ms, 100 ms, 140 ms) in modo da implementare la precedente sperimentazione ed

avere un quadro più ampio.

La deformazione orizzontale target è stata posta uguale a 5 $\mu\epsilon$.

Prima di procedere con la prova, i campioni sono stati condizionati tutta la notte per le prove a 4 °C e quattro ore per le prove condotte a 20 °C e 40 °C.

In seguito, viene riportata l'espressione analitica che permette di calcolare il modulo di rigidezza.

$$E = \frac{P}{\Delta * h} * (0.273 + \nu)$$

Dove:

- E è il modulo di rigidezza;
- P è il carico di picco applicato;
- Δ indica l'ampiezza della deformazione;
- N è il coefficiente di Poisson;
- h è lo spessore del campione

Il modulo di rigidezza è valutato lungo due diversi diametri, perpendicolari tra loro. Al termine della prova va svolto un controllo sui valori di modulo ottenuti. Se il modulo calcolato lungo il secondo diametro è differente dal primo per più del 10% o meno del 20%, allora la prova va scartata.

La macchina applica 10 impulsi di condizionamento per determinare la forza necessaria per generare la deformazione target (5 με). Ottenuto tale valore di forza, sono applicati 5 impulsi di carico. I cinque valori di modulo di rigidezza ottenuti sono poi successivamente mediati.

5.2 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA

Questa prova è stata utilizzata per poter valutare la risposta alle basse temperature dei vari sistemi modello e poter effettuare poi un confronto con la precedente sperimentazione, la quale trattava la prova alle temperature intermedie.

La natura della prova è di tipo distruttivo ed è stata svolta anch'essa con l'utilizzo dell'UTM-30, avendo bisogno di svolgere il test ad una temperatura di 4 °C.

La strumentazione di prova è composta da un castelletto dotato di basette dalla forma leggermente concava su cui posizionare il campione in equilibrio.

Il carico viene applicato mediante l'attuatore facendo attenzione che il campione si trovi nella corretta posizione e che la traversa di carico sia in contatto con il provino senza applicare alcuno sforzo su di esso.



Figura 5.3: Configurazione di prova ITS

Una volta avviata la prova, si registrano i valori di sforzo assiale e di spostamento verticale. Vengono registrati così in continuo tutti gli step di carico, ovvero le coppie di punti forza-spostamento, che serviranno per la costruzione delle curve caratteristiche. In seguito, viene riportato un esempio di curva F-s di un campione di RAP alla temperatura di prova di 4 °C, ottenuta dai punti registrati.



Grafico 5.1: Esempio di curva F-s di un campione di RAP

I campioni utilizzati per la prova hanno dimensione di 65mm e diametro 100 mm in accordo con la UNI EN 12697-23 e necessitano di essere condizionati alla temperatura di prova di 4 °C.

I campioni vengono caricati lungo la direzione assiale con una velocità di deformazione costante preimpostata, pari a 50.8 mm/min, fino all'insorgere della rottura.



Figura 5.4: Rottura tipica di un campione per trazione indiretta

La rottura avviene dunque per rottura lungo il diametro verticale a causa del crescente stato tensionale. Il parametro ITS viene calcolato analiticamente con la seguente espressione:

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

Dove:

- P è il carico assiale di picco, in kN;
- D è il diametro del campione, in mm;
- H è l'altezza del campione, in mm.

5.3 PROVE DI MODULO DINAMICO |E*|

Il conglomerato bituminoso è un materiale visco-elastico, la cui risposta in campo lineare varia al variare di temperatura e frequenza.

Tale comportamento visco elastico è causato proprio dalla presenza del bitume all'interno del conglomerato bituminoso e tali proprietà visco-elastiche verranno studiate per mezzo di prove con sollecitazione sinusoidale, le quali permettono di riprodurre le sollecitazioni tenso-deformative che si manifestano nelle reali pavimentazioni soggette al traffico veicolare. Tali prove consentono di ricavare il modulo complesso $|E^*|$ e l'angolo di fase δ , parametri importanti per descrivere le proprietà visco elastiche del materiale.

Quindi una volta compattati i campioni utili all'analisi sono stati testati con una macchina chiamata UTM-30.



Figura 5.5: UTM-30

La strumentazione di prova consiste in:

- due piastre di acciaio su cui posare i campioni, in particolare tra il campione e le piastre vengono posizionate due coppie di membrane con all'interno del grasso, in modo da ridurre gli sforzi di contatto.
- Porta trasduttori LVDT
- 3 trasduttori LVDT disposti a 120° gli uni dagli altri;
- Attuatore idraulico

Le prove sono state svolte a tre differenti temperature (4°C, 20°C, 40°C). La temperatura di prova viene valutata per mezzo di sonde termiche applicate al cuore e sulla superficie di un dummy aventi le medesime caratteristiche dei campioni in esame. I campioni utilizzati hanno altezza pari a 130 mm e diametro 100 mm. Prima di essere climatizzati alla temperatura di prova vengono attaccati, sui campioni, dei dadini sui quali verranno fissati gli alloggiamenti di supporto ai trasduttori LVDT.



Figura 5.6: Configurazione di prova UTM-30 per la determinazione di E*

Una volta condizionati i campioni e settati i parametri della prova la prova, imponendo una deformazione media compresa nel range tra 75-125 $\mu\epsilon$, la prova può essere avviata. Il carico viene applicato in modo sinusoidale con 9 diverse frequenze: 25 Hz; 20 Hz; 10 Hz; 5 Hz, 2 Hz; 1 Hz; 0.5 Hz; 0.2 Hz; 0.1 Hz. Prima di ogni applicazione del carico viene effettuata una fase di calibrazione dello strumento tramite dieci impulsi, in modo da ottenere risultati all'interno del range di accettabilità dei valori.

Al termine della prova, una volta ottenuti i valori di modulo dinamico e dell'angolo di fase, è stato possibile procedere alla costruzione delle curve maestre.

Esse sono la rappresentazione grafica del comportamento del materiale sollecitato da diverse frequenze e diverse temperature.



Grafico 5.2: Esempio di curva maestra di un campione di RAP

Quindi mediante le curve maestre si ha modo di apprezzare graficamente il comportamento dello scheletro litico (confrontando le differenti forniture di RAP) del materiale e ricavare il dosaggio ottimale di rejuvenator.

5.4 PROVE DI TRAZIONE MOASSIALE DIRETTA CICLICA

Tramite questa metodologia di prova si è voluto analizzare il comportamento dei vari sistemi modello sottoposti a carichi ciclici ripetuti in configurazione di trazione moassiale diretta ciclica. Si è scelto di utilizzare questa prova poiché è in grado di imprimere un elevato stato tensionale al bitume, discriminando quindi la risposta dei differenti sistemi modello.

L'obiettivo consiste nel definire delle leggi di risposta dei sistemi modello, con le quali indagare la diversa azione che hanno le due tipologie di rejuvenators. La macchina utilizzata per tale sperimentazione è la AMPT (Asphalt Mixture Performance Tester).



Figura 5.7: AMPT

La strumentazione è composta da:

- Cella climatica;
- Attuatore servo-idraulico;
- Pannello di accensione del sistema idraulico e del sistema di climatizzazione;
- Porta trasduttori in metallo;
- 3 trasduttori LVDT disposti a 120° gli uni dagli altri.
- Software per la registrazione dei dati ottenuti dalle prove;

La prova a rottura per trazione monoassiale diretta ciclica viene condotta in controllo di deformazione, mantenendo costante un livello deformativo picco-picco target preimpostato.

Il test viene svolto alle temperature di 15°C e frequenza 10 Hz, su campioni di altezza 130 mm e diametro 100 mm, i quali necessitano di un'opportuna climatizzazione

prima di essere testati. Gli stessi campioni sono stati precedentemente testati con prova di modulo dinamico.

I campioni devono essere preventivamente incollati, per il tramite di un legante bifase epossidico, inferiormente e superiormente a due piastre d'acciaio, in modo da rendere il campione solidale, per mezzo di viti, alla strumentazione di carico.

Una volta settati tutti i parametri di prova (temperatura, frequenza di carico, livello deformativo) è possibile far partire il test.

Prima di far partire il test di trazione monoassiale diretta ciclica vero e proprio, per prima cosa si applica al campione uno stato tensionale nullo. Successivamente viene attuato un veloce test chiamato "fingerprint" in modo da stimare il valore di modulo iniziale del campione.

I valori che vengono registrati durante la prova sono il modulo $|E^*|$ e l'angolo di fase δ , i quali saranno necessari per comprendere l'evoluzione della risposta del materiale e quindi dedurre le leggi di risposta dei diversi sistemi modello.



Figura 5.8: Rottura tipica per trazione monoassiale diretta ciclica.

La frattura che si propaga nel campione solitamente non si presenta in modo vistoso, ma si staglia all'interno di esso. Infatti, al termine della prova, per portarla alla luce bisogna sollecitare manualmente il campione fin quando non si genera una separazione netta tra le superfici.

Per definire la condizione in cui si verifica la rottura del campione, che deve essere univoca per tutti i sistemi modello, sono stati scelti i vari metodi presenti in letteratura inerenti alle classiche prove di fatica:

- Criteri basati sul decadimento del modulo. Sono stati valutati i criteri riferiti all'abbattimento del modulo del 50% (Nf 50) e del 70% (Nf 70) rispetto al valore iniziale.
- Criteri basati sull'evoluzione dell'angolo di fase φ. In questo caso è stato utilizzato il criterio che considera che la rottura sia avvenuta quando è stato raggiunto il valore massimo dell'angolo di fase (N_{f max φ}).
- Criteri ottenuti dall'analisi dell'omogeneità dei campioni. Questi criteri ci
 permettono di avere indicazioni sull'omogeneità della deformazione assiale e
 sullo stato tensionale. È stato valutato il criterio che indica l'avvenuta rottura
 quando la prima delle tre differenze di ampiezza di deformazione assiale
 misurata dai tre trasduttori supera il 25% del valore iniziale registrato.

$$\Delta \varepsilon axi = \left(\frac{\varepsilon Axi - \varepsilon Ax}{\varepsilon Ax}\right) * 100$$

Dove:

εAxi è l'ampiezza della deformazione misura dal trasduttore; εAx è l'ampiezza media delle deformazioni misurate dal trasduttore.

 Criteri energetici. In tale caso è stato valutato il criterio che si basa sull'evoluzione dell'energia cumulata dissipata al ciclo N-esimo in funzione dell'energia dissipata al ciclo N-esimo.

$$DER = \sum_{i=1}^{n} \frac{Wi}{WN}$$

Dove:

W_i è l'energia cumulata dissipata al ciclo N-esimo;

W_N è l'energia dissipata al ciclo N-esimo.

Dall'analisi delle risposte dei diversi sistemi modello, si è visto come il criterio che si adatta meglio all'interpretazione della risposta dei materiali è N_{f50} . Ciò significa che la rottura avviene dopo l'applicazione di un numero di cicli di sollecitazione a cui corrisponde un valore del modulo $|E^*|$ pari al 50 % del valore iniziale.

6 ANALISI DEI RISULTATI

Nel presente capitolo verranno trattati in modo approfondito tutti i risultati ottenuti dalle prove sperimentali effettuate in questo lavoro di tesi.

Per prima cosa verranno riportati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione volumetrica dei campioni compattati, successivamente invece verranno descritti i risultati delle varie prove meccaniche effettuate su di essi.

6.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA LAVORABILITA'

Una volta eseguita la caratterizzazione del fresato bituminoso impiegato nella presente sperimentazione, si è condotta una prima analisi sui campioni compattati.

I calcoli sono stati predisposti in modo da controllare se il parametro che regola la definizione del sistema modello, la VMA (voids in mineral aggregate) apparteneva all'intorno di ± 1 % rispetto al target considerato (30%).

In seguito, verranno mostrati i risultati ottenuti per le varie forniture di materiale costituenti i campioni compattati.

Per la *fornitura II* si è ottenuto:

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RII	3	44	9.06	63.38	21.6	2.024	2.581	2.762	4.3	4.5	29.9
RII	4	38	9.26	63.48	21.7	2.020	2.581	2.762	4.3	4.5	30.0

tabella 6.1: VMA campioni di RAP (fornitura II)

Tabella 6.2: VMA	campioni di RAP+	4%rigenerante E (fornitura II)

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	% B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RII - E - 4	1	43	8.73	64.19	21.3	2.029	2.579	2.767	4.4	4.5	29.9
RII - E - 4	2	43	9.29	64.02	20.6	2.048	2.579	2.767	4.4	4.5	29.2

Tabella 6.3: VMA campioni di RAP+8%rigenerante E (fornitura II)

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RII - E - 8	1	38	8.29	64.96	21.4	2.020	2571	2.767	4.6	4.5	30.3
RII - E - 8	2	30	8.43	65.85	21.2	2.026	2571	2.767	4.6	4.5	30.1

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm^{3})	(g/cm^{3})	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RII - E - 12	E4	33	7.96	66.11	20.9	2.024	2.560	2.767	4.7	4.5	30.3
RII - E - 12	E5	45	8.30	64.46	20.9	2.026	2.560	2.767	4.7	4.5	30.3

Tabella 6.5: VMA campioni di RAP+4%rigenerante P (fornitura II) ID SAMPLE n giri k **C1** MMVT Gse %B_{Mix} %B_{agg} VMA **M**v_{geo} Vgeo (%) (g/cm^{3}) (g/cm^{3}) (%) (%) (%) (-) (-) (-) (-) (-) (g/cm3) **P5** 34 8.53 65.30 RII - P - 4 21.2 2.028 2.576 2.767 4.4 4.5 29.9 RII - P - 4 65.75 2.576 4.5 **P6** 34 8.24 21.3 2.028 2.767 4.4 29.9

Tabella 6.6: VMA campioni di RAP+8%rigenerante P (fornitura II)

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RII - P - 8	1	40	8.61	64.36	21.4	2.022	2.574	2.767	4.6	4.5	30.3
RII - P - 8	2	31	9.05	64.83	21.2	2.028	2.574	2.767	4.6	4.5	30.1

Tabella 6.7: VMA campioni di RAP+12%rigenerante P (fornitura II)

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mv_{geo}	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RII - P - 12	P3	24	8.29	67.04	20.9	2.032	2.567	2.767	4.7	4.5	30.0
RII - P - 12	P4	33	ND	ND	21.0	2.028	2.567	2.767	4.7	4.5	30.2

 Tabella 6.8: VMA campioni di Bianco (fornitura II)

 ID
 SAMPLE
 n giri
 k
 C1
 vgeo
 MVgeo
 MMVT
 Gse
 %B_{Mix}
 %B_{agg}
 VMA

II.			IX.	C1	v geo	IVI V geo		GSC		/ UD agg	V 1V11
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
BII	1	55	9.17	63.77	20.0	2.020	2.525	2.762	4.3	4.5	30.0
BII	2	40	9.37	64.88	19.8	2.025	2.525	2.762	4.3	4.5	29.8
BII	3	23	7.91	68.84	20.1	2.017	2.525	2.762	4.3	4.5	30.1
BII	4	33	8.38	67.20	19.8	2.025	2.525	2.762	4.3	4.5	29.8

Invece per la *fornitura III* sono stati ottenuti i risultati seguenti:

Tabella 6.9: VMA campioni di RAP (fornitura III)

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm^{3})	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RIII	6	34	8.67	64.74	21.7	2.018	2.579	2.762	4.3	4.5	30.1
RIII	7	84	8.76	61.34	21.6	2.023	2.579	2.762	4.3	4.5	29.9
RIII	8	68	9.00	61.34	21.9	2.014	2.579	2.762	4.3	4.5	30.2
RIII	5	76	ND	ND	22.1	2.008	2.579	2.762	4.3	4.5	30.4

ID	SAMPLE	n	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
		giri									
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm^{3})	(g/cm^{3})	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RIII – E - 8	E1	72	8.59	62.27	21.6	2.023	2.581	2.767	4.6	4.5	30.2
RIII – E - 8	E2	62	8.78	62.46	21.5	2.026	2.581	2.767	4.6	4.5	30.1
RIII – E - 8	E3	97	8.40	61.5	21.6	2.024	2.581	2.767	4.6	4.5	30.2

Tabella 6.10: VMA campioni di RAP+8%rigenerante E (fornitura III)

Tabella 6.11: VMA campioni di RAP+8%rigenerante P (fornitura III)

ID	SAMPLE	n giri	k	C1	Vgeo	Mvgeo	MMVT	Gse	%B _{Mix}	%B _{agg}	VMA
(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(%)	(g/cm ³⁾	(g/cm ³⁾	(g/cm3)	(%)	(%)	(%)
RIII - P - 8	P1	56	9.13	62.32	21.5	2.027	2.581	2.767	4.6	4.5	30.1
RIII - P - 8	P2	75	8.90	62.94	21.6	2.023	2.581	2.767	4.6	4.5	30.2
RIII - P - 8	P3	64	8.90	62.94	21.5	2.025	2.581	2.767	4.6	4.5	30.2

Per entrambe le forniture è stato garantito l'intorno del valore target della VMA (30% \pm 1).

Andando a valutare i valori medi di lavorabilità k e autocopattazione C1 e il numero di rotazioni effettuate dalla pressa a taglio giratoria, ottenuti per entrambe le forniture, è possibile discriminare l'effetto dei rigeneranti e fare un confronto fra le due forniture di materiale.

I valori medi per la fornitura II sono:

Tabella 6.12: Valori medi del numero di rotazioni effettuate dalla pressa giratoria, lavorabilità e autocompattazione (fornitura II)

ID	n giri	k	C1	
(-)	(-)	(-)	(-)	
RAPII	41	9.16	63.43	
RII-E-4	43	9.01	64.11	
RII-E-8	34	8.36	65.41	
RII-E-12	39	8.13	65.29	
RII-P-4	34	8.39	65.53	
RII-P-8	36	8.83	64.60	
RII-P-12	29	8.29	67.04	
В	38	8.71	66.17	

Mentre i valori medi per la fonitura III risultano:

ID	k	C1	n giri
(-)	(-)	(-)	(-)
RIII	8.88	61.34	76
RIII-E-8	8.59	62.09	77
RIII-P-8	8.98	62.73	65

Tabella 6.13: Valori medi del numero di rotazioni effettuate dalla pressa giratoria, lavorabilità e autocompattazione (fornitura III)

Il confronto tra la fornitura II e III viene esposto nei seguenti grafici.



In linea generale, per quanto riguarda l'addensamento C1, esso è strettamente correlato allo scheletro litico della miscela. Infatti, dipende sia dalla dimensione degli aggregati che dalla sua forma.

Al tempo stesso, tenendo costante la struttura litica, quindi ragionando a parità di fornitura, si può denotare l'azione dei rejuvenators. Infatti, uno degli effetti di tali additivi è quello di ridurre la viscosità del legante contenuto nel RAP, rendendo quindi il materiale rigenerato più lavorabile. Come si evince dal grafico, all'aumentare del dosaggio di rejuvenators, si riduce la viscosità del legante RAP, quindi incrementa il grado di lubrificazione degli aggregati. Per tale motivo, all'aumentare del dosaggio, aumenta l'autocompattazione. Stesso discorso vale per il sistema modello B, formato dagli aggregati estratti dal RAP e bitume vergine 50/70: avendo una viscosità minore, i campioni di bianco sono caratterizzati da un grado di compattazione iniziale maggiore rispetto al sistema modello RAP.

Quanto appena detto può essere esteso anche per la fornitura III: riducendo la viscosità del legante RAP, aumenta il grado di lubrificazione, quindi aumenta l'autocompattazione.

Volendo, infine, fare un raffronto tra le due forniture, si può mettere in risalto l'effetto

che ha la struttura litica sull'autocompattazione a parità di tutte le altre condizioni. La fornitura III è caratterizzata da un aggregato di dimensioni maggiori rispetto alla fornitura II, di conseguenza presenta un angolo di attrito interno maggiore. Per tale motivo, il RAP della fornitura III presenta un valore di autocompattazione minore rispetto al RAP della fornitura II. Lo stesso ragionamento vale per i sistemi modello con l'8 % di rejuvenators.



Grafico 6.2: Lavorabilità k per le due forniture

Per quanto riguarda la lavorabilità k, si può affermare che sia un parametro che non dipende dallo scheletro litico della miscela, ma bensì dalle caratteristiche del legante. Al crescere o al diminuire di tale parametro k è associato un corrispondente aumento o decremento del gradiente di addensamento e dunque il raggiungimento più o meno rapido del livello di compattazione predefinito.

Dal grafico si evince che al crescere del dosaggio di rigenerante il parametro k ha un trend decrescente. Questo trend va in contrasto con quanto appena detto: teoricamente, i sistemi modello con rejuvenators hanno un legante meno viscoso rispetto al RAP, quindi dovrebbero essere caratterizzati da un k maggiore. Il trend dovrebbe essere crescente. In realtà, come si è visto dal grafico precedente, con l'aggiunta di rejuvenators e aumentandone il dosaggio, l'autocompattazione aumenta: ciò sottintende che i sistemi modello rigenerati si compattano tanto inizialmente e meno con il progredire della compattazione. Quanto appena detto giustifica il trend decresce con l'evolvere della compattazione. Analoga considerazione vale per il sistema modello di bianco.



Grafico 6.3: Confronto nº di rotazioni per fornitura

Un'ulteriore conferma di quanto detto pocanzi riguardo alle dimensioni degli aggregati della fornitura III, ci viene fornita osservando il numero di rotazioni necessarie a compattare i campioni di entrambe le forniture. Si evidenzia infatti che per la fornitura III, il numero di rotazioni risulta essere ben più altro rispetto alle rotazioni osservate per la fornitura II. Ciò è dovuto alle differenti granulometrie osservate: si ribadisce come la fornitura III ha una granulometria più grossolana rispetto alla fornitura II.

6.2 MODULO ELASTICO (ITSM)

Come già detto nel capitolo della sperimentazione, per valutare l'efficacia dei rigeneranti ci si è serviti di prove di modulo elastico (ITSM) e di modulo complesso $|E^*|$, per metterli poi a confronto tra di loro.

I campioni testati in questa prova hanno dimensioni di 65 mm di altezza e 100 mm di diametro. La fornitura utilizzata per la compattazione è la seconda e sono stati testati campioni di RAP, RAP+4%,6% e 8% di rigenerante E.

I risultati derivati dalle prove ITSM, svolte alle temperature di 4°C, 20°C, 40°C e tempi di picco di 60 ms, 100 ms, 140 ms, sono i seguenti:

Т	rise time	RII	RII -E - 4	RII - E - 6	RII - E - 8
(°C)	(ms)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
4	60	10834	7537	8447	7965
4	100	10236	4193	4238	3634
4	140	9099	1195	978	915
20	60	6376	7937	8187	6742
20	100	5927	3675	3692	3047
20	140	5823	967	909	717
40	60	2093	7193	7222	6896
40	100	1813	3420	3313	2802
40	140	1548	862	679	662

Tabella 6.14: Valori di E* per i vari materiali



Grafico 6.4: Valori ITSM alla temperatura di 4°C



Grafico 6.5: Valori ITSM alla temperatura di 20°C



Grafico 6.6: Valori ITSM alla temperatura di 40°C

Osservando i valori di modulo elastico del RAP per tutti e tre i grafici si evidenziano valori ben più alti rispetto agli altri materiali. Questo accade ad ogni temperatura e tempo di picco, essendo il RAP caratterizzato da un legante molto più rigido rispetto ai sistemi modello con rejuvenator.

In linea generale, il modulo elastico dei campioni rigenerati decresce al crescere del dosaggio di rigenerante, a causa dell'effetto ringiovanente sulla pellicola di bitume ossidato. Da osservare, inoltre, che alla temperatura di 4 °C il modulo elastico del sistema modello col 6% di E presenta un valore maggiore rispetto ai sistemi modello col 4% e 8%. Questa anomalia sarà tenuta in considerazione nei prossimi studi, in cui si andranno ad aumentare il numero di campioni per singola condizione di prova in modo che statisticamente i risultati ottenuti siano molto più coerenti.

6.3 RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA

Con questa tipologia di prova, per poter valutare l'efficacia dei rigeneranti, è stata indagata la risposta, in trazione indiretta, dei vari sistemi modello alle basse temperature (4°C). I risultati ottenuti verranno poi messi a confronto con i valori ottenuti dalla precedente sperimentazione, svolta alle temperature intermedie (20°C). Sono stati utilizzati campioni costituiti da RAP appartenente alla fornitura III, di altezza 65 mm e diametro 100 mm, precondizionati alla temperatura di 4 °C. A seguire vengono riportati i valori di carico massimo P (kN), spostamento a rottura s (mm) e ITS (MPa) per i vari materiali.

ID	Max P	S	ITS
(-)	(KN)	(mm)	(MPa)
RIII-1	18.91	1.08	1.85
RIII-2	18.51	0.88	1.81
RIII-3	19.05	0.93	1.87
Media	18.82	0.97	1.84
Dev.St	0.282	0.105	0.028

Tabella 6.15: Valori di Max P, s e ITS per il RAP

Tabella 6.16: Valori di Max P, s e ITS per il RAP+ 8% di rigenerante E

ID	Max P	S	ITS
(-)	(KN)	(mm)	(MPa)
RIII - E -8	5.90	1.38	0.58
RIII - E -8	6.91	1.47	0.7
RIII - E -8	6.48	1.38	0.63
Media	6.43	1.41	0.63
Dev.St	0.508	0.049	0.050

Tabella 6.17: Valori di Max P, s e ITS per il RAP+ 8% di rigenerante P

ID	Max P	S	ITS
(-)	(KN)	(mm)	(MPa)
P1	8.89	1.36	0.87
P2	7.86	1.39	0.77
Р3	8.67	1.19	0.85
Media	8.47	1.31	0.83
Dev.St	0.541	0.108	0.053

ID	Max P	S	ITS
(-)	(KN)	(mm)	(MPa)
BIII	18.05	1.27	1.77
BIII	17.26	1.19	1.69
BIII	17.35	1.11	1.70
Media	17.55	1.19	1.72
Dev.St	0.430	0.082	0.042

Tabella 6.18: Valori di Max P, s e ITS per il Bianco



Grafico 6.7: Curva media Max P – s dei vari materiali alla temperatura di 4°C

Come è possibile osservare nel grafico (6.7) vi è una differenza sostanziale nella risposta alle basse temperature dei sistemi modello formati da RAP, RAP additivato con rejuvenators e Bianco.

Infatti, osservando le pendenze del tratto di carico fino a giungere al picco, per i campioni di RAP e Bianco, è possibile denotare un comportamento più rigido rispetto ai campioni additivati: per quest'ultimi, si osserva una pendenza dello stesso tratto meno pendente, e questo è sintomo di maggiore duttilità rispetto ai precedenti. Lo stesso concetto si evidenzia guardando il carico di picco dei diversi materiali. Osservando anche lo spostamento in corrispondenza del picco, si conferma quanto detto prima: infatti, il RAP ed il Bianco raggiungono uno spostamento a rottura minore rispetto ai campioni rigenerati.

Bisogna ammettere che il comportamento del Bianco è stato alquanto inaspettato, poiché si riteneva di ottenere valori di max P, s, ed ITS prossimi ai valori dei campioni rigenerati. Probabilmente il condizionamento alle basse temperature ha irrigidito il legante vergine, causando il comportamento risultante.

In seguito, si mostra il confronto fatto con la precedente sperimentazione.



Grafico 6.8: Confronto valori di Max P tra le due prove.



Grafico 6.9: Confronto valori di spostamento a rottura tra le due prove.





Confrontando i valori ottenuti per le due prove è possibile mettere in luce le differenze principali. Guardando ai campioni rigenerati si nota un comportamento quasi indipendente dalla temperatura. Infatti, in quasi tutti i casi si evidenzia un trend abbastanza costante. Invece per i campioni di RAP e di Bianco, si osserva una sostanziale variazione tra i valori di ITS alle diverse temperature. Il condizionamento alle basse temperature evidenzia un comportamento più rigido di questi materiali. Osservando il grafico (6.9) alle basse temperature si evidenzia una riduzione dello spostamento massimo a rottura, come era possibile aspettarsi.

6.4 CURVE MAESTRE E DOSAGGIO OTTIMALE

I risultati ottenuti per mezzo di prove di modulo complesso $|E^*|$ alle differenti temperature e frequenze di carico sono stati elaborati col fine di determinare le curve maestre del modulo complesso.

Uno strumento molto utile per la descrizione delle proprietà visco elastiche dei campioni risulta essere, appunto, la *Curva Maestra*, che è la rappresentazione del comportamento del materiale sollecitato da diverse frequenze e diverse temperature.

La rappresentazione grafica è fatta sul piano bi-logaritmo dove sull'asse delle ascisse vi è la frequenza ridotta f_r (Hz) mentre sull'asse delle ordinate vi è il modulo complesso $|E^*|$. La frequenza ridotta è stata ricavata moltiplicando la frequenza di carico per un fattore chiamato shift factor, che è un parametro dipendente dalla temperatura.

Basandosi quindi sul Principio di Sovrapposizione Tempo-Temperatura, si descrive il comportamento del materiale ad una temperatura fissa entro un determinato spettro di frequenze ridotte.

In seguito, vengono riportate le curve maestre per la fornitura II, al variare del dosaggio di rejuvenators, shiftate alla temperatura di 4°C.



Grafico 6.11: Curve maestre di RAP, Bianco, e rigenerati al 4%



Grafico 6.12: Curve maestre di RAP, Bianco, e rigenerati all' 8%



Grafico 6.13: Curve maestre di RAP, Bianco, e rigenerati al 12%



Grafico 6.14: Curve maestre fornitura II con temperature di riferimento 4°C

Si nota come all'aumentare del dosaggio, i sistemi modello con rejuvenators sono caratterizzati da valori di modulo complesso |E*| decrescenti: ciò può essere dovuto ad un'azione di softening esercitata dai rejuvenators, in quanto tendono a riportare le

caratteristiche reologiche del bitume invecchiato verso quelle di un legante non invecchiato.

Inoltre, attraverso l'interpretazione delle curve maestre, si è definito un valore di dosaggio ottimale rejuvenators. Il dosaggio ottimale è stato definito come quella percentuale da aggiungere al RAP in modo che la risposta viscoelastica del sistema modello rigenerato sia comparabile con quella di riferimento, ossia il sistema modello Bianco. In altre parole, ci si aspetta che col dosaggio ottimale la curva maestra del sistema modello rigenerato si sovrapponga (quasi totalmente) con quella del sistema modello Bianco, posto come condizione di riferimento.

Dal grafico (6.12) si evidenzia che la percentuale di rigenerante ottimale risulta essere l'8% per entrambi i rejuvenators. Infatti, le curve maestre dei campioni rigenerati si sovrappongono in modo accettabile alla curva maestra del Bianco.



Grafico 6.15: Curve maestre fornitura III di RAP, Bianco, e rigenerati all' 8%

Vengono riportati anche i risultati ottenuti per la fornitura III per poter effettuare un confronto tra le due e determinare l'effetto dello scheletro litico sulla risposta viscoelastica.



Grafico 6.16: Confronto curve maestre fornitura II e III di RAP, Bianco, e rigenerati all' 8%

Come si evince dal grafico soprastante, le curve maestre inerenti alla fornitura III risultano essere leggermente spostate verso l'alto rispetto alla fornitura due. Questo dipende maggiormente dallo scheletro litico costituente i campioni della fornitura III, caratterizzato da una composizione granulometrica più grossolana rispetto alla fornitura II.

Anche per la fornitura III il dosaggio ottimale di rigenerante risulta essere pari all'8% in peso di bitume.

Infine, è stato effettuato un confronto tra il modulo elastico in configurazione di trazione indiretta (ITSM) e il modulo complesso $|E^*|$ derivante dall'analisi dei campioni della fornitura II sopracitata. In questo modo, si vuole dedurre se le evidenze ottenute con una metodologia più avanzata con una macchina di prova più performante (modulo complesso $|E^*|$) sono comparabili con una metodica di prova eseguita con macchine più modeste (modulo elastico ITSM).

In seguito, vengono espressi i risultati di tale confronto per i vari sistemi modello. Da tener presente che le rappresentazioni grafiche sotto riportate non sono in scala logaritmica e che i tempi di picco della prova ITSM pari a 60 ms, 100 ms e 140 ms sono stati approssimati con le frequenze di 4.2 Hz, 2.5 Hz e 1.8 Hz.



Grafico 6.17: Confronto curve maestre fornitura II e ITSM del RAP

Il confronto tra sistemi modello di RAP ha evidenziato un comportamento piuttosto simile, in particolare alla temperatura di 20°C i risultati sono sovrapponibili. Invece, alla temperatura di 4°C, i valori di ITSM sono sovrastimati eccetto alla frequenza di 1.8 Hz. In misura molto ridotta, i valori di modulo elastico a 40 °C sono sottostimati rispetto ai valori di modulo complesso |E*|: si può ritenere tale variazione trascurabile.



Grafico 6.18: Confronto curve maestre fornitura II e ITSM del RAP+4% di rigenerante E



Grafico 6.19: Confronto curve maestre fornitura II e ITSM del RAP+8% di rigenerante E

Il confronto tra le due prove per i campioni rigenerati, invece, produce risultati contrastanti. Infatti, si evidenzia che per il campione RII – E – 4 i valori di ITSM sono sottostimati a tutte le temperature di prova rispetto a quello di E*. Mentre per il campione RII – E – 8 si osserva una tendenza opposta. I valori di modulo elastico sono sovrastimati, se non alla temperatura di 40°C, dove vi è perfetta sovrapposizione.

In virtù di quanto detto, i risultati ottenuti risultano essere contrastanti ma comunque una base di partenza per mettere a confronto prove differenti. Maggiori differenze sono state riscontrate alle basse temperature mentre alle alte e intermedie sembra esserci buona approssimazione.

6.5 PROVE DI TRAZIONE MONOASSIALE DIRETTA CICLICA

Tramite questa tipologia di prove è stato possibile analizzare il comportamento dei vari sistemi modello sollecitati in trazione diretta monoassiale ciclica. Per mezzo di queste prove è stato possibile determinare l'evoluzione del modulo dinamico e dell'angolo di fase, in modo da esprimere in modo qualitativo l'efficacia dei rigeneranti.

I campioni utilizzati per queste prove sono stati 12, la maggior parte prodotti con il fresato della III fornitura (3 campioni di Bianco e 1 di E sono stati confezionati con il RAP della II fornitura). Tutti i campioni hanno altezza 130 mm e diametro 100 mm.

ID	Deformazioni
(-)	(με)
RIII-7	170
RIII-8	150
RIII-E3-8	160
RIII-E2-8	200
RIII-E1-8	170
RII-E1-8	220
RIII-P1-8	160
RII-P2-8	170
RIII-P3-8	200
BII - 2	150
BII - 3	160
BII - 4	170

Tabella 6.19: Campioni utilizzati per la fatica e corrispondenti deformazioni imposte

Si specifica nuovamente che le prove sono state svolte in configurazione di trazione diretta, alla temperatura di 15°C e frequenza di 10 Hz. Le deformazioni riportate nella tabella precedente sono deformazioni da picco a picco.

In seguito, sono riportati i risultati grafici dell'andamento del modulo $|E^*|$ in funzione del numero di cicli di tali prove.



Grafico 6.20: Rappresentazione grafica dei campioni di RAP

Guardando il grafico soprastante si evince che i campioni di RAP, essendo caratterizzati da un legante molto rigido, e quindi molto fragile, non sviluppano alcuna resistenza significativa nei confronti della sollecitazione di trazione diretta ciclica. La rottura si è attestata per entrambi i campioni nell'ordine di 1500 cicli. Da tener presente che la rottura dei campioni di RAP è avvenuta in prossimità delle piastre in acciaio, quindi al di fuori della zona di lettura dei trasduttori, portando ad una rottura del tipo Edge failure. Tale tipo di comportamento, come già indicato, è associato sicuramente alla natura del materiale ma anche alla concentrazione di stati tensionali alle estremità del campione e a volumetria non omogenea.



Grafico 6.21: Rappresentazione grafica dei campioni di RAP+8% di rigenerante E



Grafico 6.22: Rappresentazione grafica dei campioni di RAP+8% di rigenerante P



Grafico 6.23: Rappresentazione grafica dei campioni di Bianco

Come ampiamente dettagliato, i sistemi modello con rejuvenators sono confezionati con RAP a cui è aggiunto l'additivo rigenerante.

Il sistema modello RAP, che non è in grado di sviluppare alcune resistenze nei confronti della sollecitazione di trazione ciclica, quando trattato con i rejuvenators, esibisce un comportamento nettamente differente.

Con l'aggiunta dei rigeneranti è possibile affermare che la resistenza di tali campioni è fortemente incrementata, infatti raggiungono valori del numero di cicli dell'ordine del milione. Inoltre, come atteso, all'aumentare del livello di deformazione imposto il materiale giunge a rottura con un numero di applicazioni del carico ridotte, raggiungendo prima la rottura. Si nota un andamento delle curve piuttosto simile tra i due diversi rigeneranti utilizzati.

Per quanto riguarda il sistema modello Bianco, è possibile osservare, come atteso, un netto miglioramento delle caratteristiche meccaniche rispetto al sistema modello RAP. Infatti, i campioni raggiungono un numero di cicli a rottura pari ai campioni rigenerati. La differenza sostanziale tra i campioni di Bianco ed i campioni rigenerati risulta essere dovuta al trend della riduzione del modulo. Infatti, per i sistemi modello con rejuvenators si ha una riduzione repentina nei primi cicli per poi avere un andamento costante, invece i bianchi si comportano in maniera opposta.

Per cercare di discriminare al meglio le caratteristiche dei vari materiali si è pensato di confrontare materiali diversi con la medesima deformazione imposta.



Grafico 6.24: Andamento del modulo E alla deformazione imposta di 150 micro-strain

I campioni testati con una deformazione imposta di 150 $\mu\epsilon$ sono il RAP ed il Bianco: si confronta la risposta dei due sistemi modello per bassi livelli di deformazione. Si evince come il campione di Bianco resiste di più rispetto al campione di RAP.



Grafico 6.25: Andamento del modulo E alla deformazione imposta di 160 micro-strain

Ad una deformazione di picco-picco di 160 μ e sono stati testati un campione con rejuvenator E, uno con rejuvenator P e un campione di bianco. L'evoluzione del modulo |E^{*}| è sempre decrescente, come atteso, ma è possibile evidenziare la differente risposta dei materiali. Il bianco presenta un decremento repentino del modulo |E^{*}| intorno ai 300'000 cicli mentre il campione con il rejuvenator P presenta una rapida decaduta del modulo intorno ai 500'000 cicli. Per il rejuvenator E, invece, non si denota alcuna variazione del modulo, che decresce linearmente fino ad 1'000'000 di cicli senza presentare alcuna inflessione.



Grafico 6.26: Andamento del modulo E alla deformazione imposta di 170 micro-strain

Col grafico 6.25, invece, è possibile mettere a confronto i quattro sistemi modello. Da tener presente che il sistema modello Bianco e sistemi modello con rejuvenators hanno il modulo iniziale molto simile, il che permette di realizzare un confronto significativo. Come già visto, il sistema modello RAP non presenta alcuna resistenza per via del legante eccessivamente rigido, il quale, dopo essere stato rigenerato, risulta avere un comportamento meno fragile. Di conseguenza, i sistemi modello E e P sono in grado di sviluppare resistenza alle sollecitazioni cicliche presentando un trend lineare fino al 1'000'000 di cicli. Da tener comunque presente la decrescita del modulo |E*| nei primi cicli di carico. Al contrario, invece, il sistema modello Bianco non presenta alcun abbattimento del modulo |E*| nei primi cicli di carico ma intorno ai 280'000 cicli di carico, momento in cui c'è una rapida decaduta.

Visti i risultati ottenuti, viene confermata l'efficacia degli additivi rigeneranti nelle RAP poiché l'effetto rigenerante comporta un aumento di resistenza ai carichi ciclici ripetuti.

Col fine di estremizzare il comportamento sotto carichi ciclici in trazione diretta, i due sistemi modello con rejuvenators E e P sono stati testati con una deformazione picco-



picco molto più elevata rispetto ai precedenti casi. Tale deformazione è pari a 200 µɛ.

Come si evince dal grafico, per tale livello di deformazione, si nota una notevole decrescita del modulo dopo 300'000 cicli. Trend simile per il sistema modello Bianco soggetto, però, a deformazione picco-picco nettamente inferiori. È da specificare che alla luce dei risultati, si evince che i campioni di RAP rigenerati con l'additivo P resistano meglio agli sforzi generati da carichi ciclici, rispetto ai campioni di RAP additivati con il rigenerante E.

Si è, infine, definita una legge di risposta dei materiali nei confronti della sollecitazione di trazione diretta ciclica, diagrammando i risultati ottenuti nel piano (ϵ - N_f). N_f è il numero di cicli in corrispondenza del quale si registra un abbattimento del modulo iniziale del 50%. Si è scelto di utilizzare N_{f50%} poiché è uno dei più utilizzati in letteratura ed anche perché tutti gli altri criteri trattati non sono stati utili allo scopo di definire il numero di cicli necessari per la rottura N_f. In seguito, vengono riportati i valori del numero di cicli a rottura scaturiti dall'uso dei vari criteri e la legge di risposta dei materiali.

ID	$N_{f50\%}$	$N_{f70\%}$	$N_{fmax\phi}$	$N_{f\Delta\epsilon ax}$	N_{fWN}
RIII-7 - 170 με	1570	ND	ND	ND	ND
RIII-8 - 150 με	560	ND	ND	ND	ND
RIII-E3-8 - 160 με	54820	ND	ND	ND	508940
RIII-E2-8 - 200 με	14990	ND	539500	ND	ND
RIII-E1-8 - 170 με	26850	ND	ND	ND	ND
RII-E1-8 - 220 με	6870	ND	562550	191280	307850
RIII-P1-8 - 160 με	357550	ND	ND	686550	689670
RII-P2-8 - 170 με	186210	ND	998880	ND	ND
RIII-P3-8 - 200 με	13990	516820	484180	272270	480470
Β2 - 150 με	499270	874320	ND	499270	514840
Β3 - 160 με	322360	660700	365880	341460	371550
Β4 - 170 με	224740	547440	655650	274370	457090

Tabella 6.20: Valori di N_f per i vari criteri utilizzati


Grafico 6.28: Legge di risposta per i vari sistemi modello

Una volta determinata la legge di risposta dei materiali è possibile fare alcune considerazioni circa l'azione dei rejuvenators. Innanzitutto, il sistema modello RAP, come evidenziato più volte, non sviluppa alcuna capacità di resistere alle sollecitazioni di trazione diretta ciclica. Il motivo è da ricerca prevalentemente nella natura del legante bituminoso in esso contenuto, che risulta essere particolarmente rigido e quindi fragile. Con l'aggiunta dei rejuvenators, quindi il sistema modello E e P, si rigenera il legante RAP: infatti, la risposta meccanica è nettamente migliore, i sistemi modello rigenerati sviluppano una certa capacità di assorbire sollecitazioni così estreme. Come atteso, infine, il sistema modello Bianco è quello più performante: il legante vergine garantisce la migliore risposta alle sollecitazioni meccaniche.

7 CONCLUSIONI

In questo studio sperimentale è stata valutata l'efficacia dei gli additivi rigeneranti del fresato bituminoso (RAP) attraverso uno strumento già definito in una precedente sperimentazione, ossia il sistema modello.

Il sistema modello ha la finalità di mettere in evidenza la risposta della fase legante rigenerata operando con una classe di fresato bituminoso "quasi mono-granulare". Da sottolineare come il sistema modello non riproduce in nessun modo miscele bituminose composte dal 100 % di RAP.

Sono stati definiti diversi sistemi modello, composti sempre dalla stessa struttura litica, indipendentemente dall'aggiunta di rigeneranti o bitume vergine, e volumetria costante, definita per mezzo del parametro VMA pari al 30 %. In questo modo, si generano dei campioni per ogni sistema modello caratterizzati da uguali punti di contatto saldati tra di loro dal bitume, condizionato in vari modi. I sistemi modello prevedevano 100% RAP, 100% RAP con rejuvenator E e P, e aggregati estratti dal sistema modello RAP miscela con bitume vergine 50/70. Quest'ultimo sistema modello è stato posto come condizione di riferimento.

Gli obbiettivi principali di tale sperimentazione hanno riguardano la definizione del dosaggio ottimale, per il tramite della risposta viscoelastica in campo lineare variando il contenuto dei rigeneranti E e P. Definito il dosaggio ottimale, i diversi sistemi modello sono stati oggetto di prove in configurazione di trazione monoassiale diretta ciclica e prove a bassa temperatura in configurazione di trazione indiretta. Analizzando tutti i risultati acquisiti dalla sperimentazione portata avanti è emerso che:

Per quanto riguarda le caratteristiche di addensamento, si osserva che i
parametri di lavorabilità k e di auto addensamento C1 ed il numero di
rotazioni, subiscono notevoli variazioni in funzione del dosaggio di
rigenerante, bitume vergine d'aggiunta e fornitura di RAP utilizzate.
Infatti, all'aumentare del dosaggio o aggiungendo bitume vergine, C1 aumenta
mentre k decresce. All'aumentare del contenuto di rejuvenators, si riduce la
viscosità del bitume RAP, quindi aumenta il grado di lubrificazione degli
aggregati con conseguente aumento della compattazione iniziale (aumento
C1). Di conseguenza, col progredire della compattazione, k tende a ridursi. Le
caratteristiche di addensamento sono fortemente influenzate dal dosaggio
selezionato. Da notare che C1 e k non assumo un trend tale che permetta di
individuare un dosaggio ottimale.

Il confronto tra le due forniture di RAP ha evidenziato la dipendenza dello scheletro litico sia per l'auto addensamento che per il numero di rotazioni. Infatti, la terza fornitura di materiale, avendo una composizione granulometrica più grossolana, fa più "fatica" a compattarsi rispetto alla fornitura 2, che invece ha una granulometria più fine.

- 2. Dalle prove ITSM si è evinto che alle basse temperature l'effetto dei rigeneranti sembra contrastato dall'irrigidimento causato dalla climatizzazione dei campioni. Nonostante ciò, si osserva una riduzione del 20% circa del modulo elastico rispetto al RAP. Invece alle temperature intermedie ed alte, è stata evidenziata una notevole riduzione del modulo elastico all'aumentare del dosaggio, compreso tra il 35 % ed il 50 %.
- 3. Dalle prove di modulo dinamico, si è indagata la risposta viscoelastica in campo lineare dei quattro sistemi modello, impiegando come dosaggi 4%, 8% e 12% sul peso di bitume RAP. Si nota come all'aumentare del dosaggio, aumenta l'azione dei softening esercitata dai rejuvenators, quindi si verifica un decremento del modulo rispetto al sistema modello RAP. L'analisi della risposta viscoelastica dei sistemi modello rigenerati con diverse percentuali di rejuvenators ha permesso di individuare il dosaggio ottimale pari all'8%. Con tale dosaggio, la curva maestra del modulo complesso |E*| dei sistemi modello rigenerati si sovrappone con quella del sistema modello Bianco, posto come condizione di riferimento.
- 4. I valori di modulo elastico (ITSM) sono stati sovrapposti con le curve maestre ottenuti con una procedura di prova più avanzata (UTM). Sebbene i valori di modulo nelle due diverse configurazioni siano prossimi tra loro, non si è notata una perfetta sovrapposizione se non alle alte temperature (40 °C). Alle temperature basse e intermedie, la prova ITSM sovrastima o sottostima il modulo |E*| senza un preciso trend. Ciò significa che la prova ITSM richiede ulteriori implementazioni prima di essere impiegata per la definizione del dosaggio ottimale e quindi studio dei sistemi modello.
- 5. Dalle prove ITS a 4 °C si è evidenziato un notevole decremento dei valori di resistenza a trazione indiretta per i campioni rigenerati rispetto ai campioni di RAP e Bianco, che sono prossimi tra loro. Confrontando i valori ottenuti con i corrispondenti sistemi modello testati nella precedente sperimentazione a 20 °C, si osserva un comportamento dei campioni rigenerati indipendente dalla temperatura di prova. I campioni di RAP e Bianco invece ne vengono

influenzati. Ulteriori analisi devono essere portate avanti per approfondire sul comportamento duttile/fragile dei diversi sistemi modello, analizzando l'area sottesa alla curva forza-spostamento, osservandone anche la pendenza del ramo ascendente e discendente.

6. Osservando i risultati ottenuti dalle prove in trazione monoassiale diretta ciclica si deduce che l'effetto dei rigeneranti rimarca un notevole incremento dei cicli necessari per raggiungere la rottura, rispetto ai campioni di solo RAP. Ciò accade anche aggiungendo il bitume vergine, ma si evidenzia un andamento leggermente diverso del decremento del modulo rispetto ai campioni rigenerati. Un'evidenza particolare è stata riscontrata per i campioni rigenerati testati con le deformazioni imposte più basse, ovvero che non si osserva la presenza di un ginocchio nella curva di decadimento del modulo che demarca l'avvento della rottura.

Quanto ottenuto ha permesso di evidenziare l'effetto tangibile dell'uso dei rigeneranti all'interno delle miscele composte da RAP. Infatti, dalle varie prove sono stati ottenuti valori di modulo e rigidezza decisamente più bassi per i campioni rigenerati, rispetto ai campioni di solo RAP, e questo è il sintomo dell'avvenuta rigenerazione della pellicola di bitume ossidata che riveste il RAP. Inoltre, l'aumento esponenziale dei cicli a rottura per i campioni rigenerati conferma quanto detto pocanzi.

Tra i due rigeneranti impiegati, il più performante risulta essere il rejuvenator P.

Gli obiettivi che ci eravamo prefissati sono stati così raggiunti, ma tale sperimentazione necessita di essere ampiamente sviluppata, in modo da ottenere dati derivanti da diverse metodologie di prova e utilizzando, per la costruzione del sistema modello, diverse tipologie sia di RAP che di rigenerante.

8 BIBLIOGRAFIA

- Martins Zaumanis, Rajib B. Mallick, Lily Poulikakos, Robert Frank (2014)
 "Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures"
- Davide Dalmazzo, Leonardo Urbano, Pier paolo Riviera, Ezio Santagata "Testing of reclaimed asphalt model systems for the evalu-ation of the effectiveness of rejuvenators"
- *Martins Zaumanis, Rajib B. Mallick, Robert Frank* (2014) "100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis"
- Imad L. Al-Qadi (2014) "RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT A LITERATURE REVIEW"
- *Taher Baghaee Moghaddam, Hassan Baaj* (2016) "The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review"
- *Peiliang Cong, Hongjie Hao, Yihan Zhang, Weihua Luo, Dianmei Yao* (2016) "Investigation of diffusion of rejuvenator in aged asphalt"
- Robert Karlsson and Ulf Isacsson (2006) "Material-Related Aspects of AsphaltRecycling—State-of-the-Art"
- Soohyok Im, Pravat Karki, Fujie Zhou (2016) "Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators"
- *Aybike Ongel, Martin Hugener* (2015) "Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen"
- *Alireza Zeinali Siavashani* (2014) "DEVELOPMENT OF INDIRECT RING TENSION TEST FOR FRACTURE CHARACTERIZATION OF ASPHALT MIXTURES"
- *Weimin Song, Baoshan Huang, Xiang Shu* (2018) "Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement"
- Yue Xiao, Chao Li, MiaoWan, Xinxing Zhou, Yefei Wang and Shaopeng Wu (2017) "Study of the Diffusion of Rejuvenators and Its Effect on Aged B. Huang, X. Shu and E. G. Burdette (2006) "Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements"
- Iswandaru Widyatmoko (2006) "Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling"

- *Nouffou Tapsoba, Cedirc Sauzeat, and Herve Di Benedetto* (2013) "Analysis of Fatigue Test for Bituminous Mixtures"
- UNI EN 12697-31
- UNI EN 12697-39
- UNI EN 12697-48
- UNI EN 933-1
- AASHTO T307
- UNI EN 12697-2
- UNI EN 12697-5
- UNI EN 12697-23
- UNI EN 12697-26