Università Politecnica delle Marche

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

CARATTERIZZAZIONE PRESTAZIONALE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI DI RECUPERO

PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF HOT-RECYCLED BITUMINOUS MIXTURES

TESI DI LAUREA DI

Lausdei Vittorio

RELATORE

Prof. Ing. Bocci Maurizio

Anno Accademico 2018 - 2019

Sommario

Introduzione 3

1. Il conglomerato bituminoso di recupero 6
1.1. Il degrado naturale della pavimentazione stradale 6
1.2. Definizione e caratteristiche del fresato stradale 7
1.3. Le tecniche di riciclaggio 9
1.3.1. Riciclaggio a caldo 10
1.3.2. Riciclaggio a freddo 12
1.4. L'invecchiamento del bitume 13
1.5. Gli additivi rigeneranti 15

2. Programma sperimentale 16
2.1. Obbiettivi e elenco delle miscele realizzate 16
2.2. Materiali 17
2.2.1. Aggregati calcarei 17
2.2.2. Sabbia calcarea 20
2.2.3. Filler di recupero 22
2.2.4. RAP 24
2.2.5. Bitume 50/70 27
2.2.6. Additivo Rigenerante 27
2.3. Apparecchiature e protocolli di prova 28
2.3.1. Miscelazione e compattazione delle miscele 28
2.3.1.1. Pressa a taglio giratorio (UNI EN 12697-31) 33
2.3.2. Determinazione delle proprietà volumetriche 35
2.3.3. Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) 37
2.3.4. Prova di rottura a trazione indiretta (ITS) 43
2.3.5. Prova a fatica (ITF) 45

2.4. Specifiche tecniche di capitolato 49

3. Analisi dei risultati 53

3.1. Determinazione curve granulometriche aggregati 53

3.2. Mix 1 – 00 RAP 55

3.3. Mix 2 – 50 RAP 65

3.4. Mix 3 – 50 RAP + ADDITIVO 75

3.5. Confronto prestazionale tra le 3 miscele testate 85

Conclusioni 91

Bibliografia 94

Introduzione

Negli ultimi decenni si è assistito ad un progressivo aumento della mobilità su gomma e in particolare del trasporto, che vede impiegati mezzi pesanti. Nonostante le infrastrutture viarie abbiano subito, in molti casi, importanti progetti di potenziamento questo aumento ha comportato comunque una progressiva accelerazione del processo di deterioramento delle infrastrutture e in particolare delle pavimentazioni con la conseguente necessità di eseguire interventi di manutenzione sempre più frequenti.

Da qui nascono le due problematiche principali degli interventi di risanamento delle pavimentazioni:

- Problema di tipo economico
- Problema di tipo ambientale.

Il primo problema è legato principalmente alla limitatezza delle risorse economiche a disposizione dei gestori della rete stradale, e con riferimento particolare agli enti pubblici, i quali a seguito anche della crisi economica hanno dovuto affrontare una riorganizzazione delle risorse economiche a disposizione.

Il secondo problema invece è legato prevalentemente all'eccessivo sfruttamento di risorse naturali, quali ad esempio gli aggregati vergini che derivano dalle cave, e all'accumulo e successivo smaltimento del materiale di risulta derivante dallo smantellamento degli starti della pavimentazione che devono essere sostituiti.

Un'importante soluzione a fronte di queste due principali, ed altre problematiche è individuabile nel riciclaggio. Il riciclaggio consente di riutilizzare il materiale derivante dalla fase di fresatura della pavimentazione esistente, nel nuovo materiale che si andrà ad utilizzare nella ristrutturazione.

In quest'ottica negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi progetti di ricerca e sperimentazione volti ad individuare tecniche di riciclaggio del fresato che permettano un riutilizzo importante, in termini di quantitativi, del fresato e allo stesso tempo efficienti in termini economici e tecnici.

Ad oggi il riutilizzo del fresato avviene costantemente, in quanto comporta un vantaggio economico nei produttori di conglomerato bituminoso in quanto è un materiale molto meno costoso rispetto all'aggregato vergine, ma in maniera limitata: il quantitativo massimo che ad oggi si riesce a riutilizzare nelle nuove miscele è circa il 30% sul totale dell'aggregato per strati di base. Questo esigue riutilizzo, in termini di quantitativi, è dovuto al fatto che di per sé, a causa del processo di ossidazione che ha subito il materiale durante la sua vita utile, il fresato causa nella nuova miscela un generale irrigidimento ed aumento della fragilità del materiale che subirebbe quindi un processo di deterioramento molto più rapido di un classico conglomerato bituminoso. Proprio per questo sono stati introdotti nel mercato gli additivi rigeneranti, ovvero prodotti che se immessi in determinate quantità nella miscela contenente fresato si riuscirà ad ottenere proprietà meccaniche del materiale adeguate alle necessità tecniche.

La seguente sperimentazione rientra nell'ampio progetto di ricerca del Dipartimento Strade dell'Università Politecnica delle Marche, sul riciclaggio delle pavimentazioni e più in particolare nel riciclaggio a caldo. Tale programma si prepone come obiettivo il raggiungimento di una quantità pari al 50% di RAP, sul totale degli aggregati, da inserire nelle miscele di nuovo conglomerato bituminoso. Il programma di sperimentazione prevede di procedere testando numerose miscele, ognuna caratterizzate con materiali derivanti da impianti per la produzione di conglomerato bituminoso per lo strato di binder, con l'aggiunta di diversi additivi e in quantità differenti in modo da poter definire quali e in quali quantità permettono un raggiungimento degli standard prestazionali del conglomerato contente RAP.

Il programma sperimentale prevede una prima fase di preparazione delle miscele e una successiva analisi delle caratteristiche meccaniche e prestazionali fondamentali per la caratterizzazione del materiale. Ai fini del confronto nella seguente sperimentazione sono state realizzate, testate e confrontate tre miscele: la prima costituita di solo materiale vergine, la seconda contente un 50% di RAP e la terza, anch'essa contenente 50% di RAP, riferito al totale degli aggregati, caratterizzata dalla presenza di un additivo rigenerante.

La presente tesi è così strutturata:

- Introduzione
- Capitolo 1 – Il conglomerato bituminoso di recupero

Qui verranno descritti il materiale fresato e le tecniche di riciclaggio

- Capitolo 2 – programma sperimentale

In questo capitolo verranno definiti gli obbiettivi della seguente sperimentazione, verranno descritti i materiali impiegati e le apparecchiature utilizzate e verranno definite le specifiche di capitolato a cui si è fatto riferimento

- Capitolo 3 – Analisi dei risultati
- Conclusioni
- Bibliografica e sitografia

1. Il conglomerato bituminoso di recupero

Gli interventi volti al mantenimento delle pavimentazioni stradali, ed in particolare quelli di tipo straordinario in cui è prevista la sostituzione completa o parziale sostituzione della sovrastruttura stradale, prevedono una preventiva fase di rimozione degli starti ammalorati con il conseguente accumulo di materiale di risulta, denominato conglomerato bituminoso di recupero o RAP.

1.1. Il degrado naturale della pavimentazione stradale

Sin dalle prime fasi di vita, ovvero subito dopo la stesa del conglomerato bituminoso, la pavimentazione stradale inizia un processo di degrado, dovuto sia a fattori ambientali che ai carichi veicolari a cui essa sarà soggetta.

I fattori ambientali, in particolare, tendono ad interessare prevalentemente gli strati più superficiali della pavimentazione: il conglomerato bituminoso, esposto a variazioni termiche e ai raggi ultravioletti, inizia il processo di invecchiamento, consistente nella perdita progressiva delle componenti organiche volatili presenti nel bitume, che porta alla progressiva perdita di caratteristiche meccaniche come viscosità ed l'elasticità. Questa prima fase di invecchiamento, che comporta l'irrigidimento del materiale, ha come conseguenza una maggior suscettibilità agli sforzi ciclici di compressione e trazione, generati dai veicoli in transito, del manto più esterno che portano ad una prima fessurazione.

Quando questo strato superficiale perde la propria integrità e capacità strutturale, gli strati inferiori saranno soggetti a maggiori aggressioni derivanti sia degli agenti climatici che dai carichi veicolari. I principali agenti degradanti sono l'acqua e il traffico. L'acqua a causa delle fessure in superficie riesce a penetrare all'interno della struttura più interna. Se sussiste una carenza nella capacità impermeabilizzante degli strati più a diretto contatto con il sottofondo, l'acqua penetrerà in quest'ultimo causando una perdita della portanza con conseguente progressivo cedimento del piano viabile al passaggio di veicoli. Altrimenti l'acqua, penetrata negli strati sottostanti la superficie, tenderà ad accumularsi e porterà ad un progressivo deterioramento del conglomerato bituminoso a causa delle sollecitazioni che genererà al suo interno: infatti successivamente a tale accumulo il passaggio dei veicoli sulla carreggiata manderà in pressione l'acqua o, se presenti temperature all'interno della pavimentazione tali da far solidificare il liquido, l'acqua solidificherà con un aumento importante di volume, il quale contrastato del materiale soprastante causerà la nascita di sollecitazioni nella pavimentazione.

Il carico veicolare ed in particolare l'azione dovuta ai veicoli pesanti, come si può dedurre facilmente, incide in modo significativo sul degrado della sovrastruttura. Tuttavia a volte ha anche un ruolo benefico in quanto ad ogni passaggio, imprimendo nella pavimentazione una piccola deformazione, mantiene vivo il conglomerato contrastando leggermente l'indurimento dovuto al processo di ossidazione.

Figura 1.1 esempio fessurazione pavimentazione stradale

1.2. Definizione e caratteristiche del fresato stradale

Per conglomerato bituminoso di recupero o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) si intende un materiale costituito di aggregati lapidei, a loro volta caratterizzabili attraverso una curva granulometrica, e bitume invecchiato derivante dalle fasi di fresatura o scarifica degli strati di conglomerato bituminoso che costituiscono la pavimentazione stradale.

Il processo di asportazione può essere eseguito con diverse apparecchiature e in modo più o meno selettivo a seconda dei successivi utilizzi:

- Fresatrici: consentono di demolire in modo selettivo i vari strati della pavimentazione, il che permette di separare le varie tipologie di

conglomerato bituminoso demolito, in relazione al tipo di bitume e alla granulometria; il conglomerato bituminoso derivante da demolizione con frese viene chiamato fresato

- Scarificatrici: vengono impiegate quando non è richiesta regolarità superficiale al termine del processo di asportazione. Per mezzi scarificatrici si intendono ripper, escavatori o altre apparecchiature simili.

Figura 1.2 demolizione con fresa

Il riutilizzo di tale materiale è sconsigliato nella formazione di sottofondi e/o strati di fondazione non legati sia per motivi tecnici, infatti il RAP senza l'aggiunta di leganti ha una scarsa capacità portante a causa della mancanza di fine e dell'attrito interno tra i granuli per la presenza del bitume, sia per motivi economici: il conglomerato bituminoso è comunque costituito da aggregati pregiati ovvero di elevate caratteristiche meccaniche e da bitume, quindi non è opportuno utilizzarlo al fine di rimpiazzare materiali più economici e facilmente reperibili.

Le proprietà del RAP sono strettamente connesse alle proprietà dei materiali che lo costituiscono, quindi al tipo di conglomerato bituminoso utilizzato nella pavimentazione da cui deriva (bitume impiegato, tipologia ed assortimento degli aggregati ecc.) e dalla funzione del conglomerato d'origine (strato di base, binder o usura). Inoltre la composizione del RAP è influenzata strettamente da elementi derivanti dalle fasi manutentive a cui è stata sottoposta l'infrastruttura: dal numero di volte che la pavimentazione è stata rifatta, se tali interventi manutentivi hanno previsto una preventiva asportazione del materiale preesistente o se si è limitato nella stesa del nuovo conglomerato al di sopra di quello invecchiato, la quantità di rappezzi e di sigillature delle fessure e la tipologia di materiale utilizzato in essi ed in fine la possibile applicazione di precedenti mani d'attacco.

In reazione alla tipologia di apparecchiatura, alla velocità di avanzamento ed allo stato della pavimentazione il RAP derivante dalla fase di demolizione sarà caratterizzato da quantità variabili di grumi, placche o blocchi. Per ottenere un materiale più omogeneo e riutilizzabile in miscele future è necessario sottoporlo ad un ulteriore processo di frantumazione in centrale. Al fine di raggiungere le migliori condizioni di riutilizzo è opportuno predisporre, nelle centrali di stoccaggio, cumuli separati e distinti per ciascuna tipologia omogenea (stato di base, binder o usura) e se possibile effettuare anche una separazione basata sulla dimensione degli elementi. Il fresato di per se non è un materiale suscettibile all'acqua ma se esposto alla pioggia esso tende ad accumulare umidità che poi creerà inconvenienti nella realizzazione delle future miscele in cui verrà impiegato: a tale scopo i cumuli di fresato dovrebbero essere protetti da tettoie.

Per quanto riguarda le proprietà fisiche del fresato si può dire che la densità di volume del materiale derivante dalla fase di frantumazione è leggermente inferiore a quella dell'aggregato vergine e si aggira interno a 2000÷2600 kg/m^3; presenta un contenuto di legante circa simile a quello presente nella miscela iniziale, ovvero 4÷6%. Il materiale è caratterizzato inoltre da un livello di umidità naturale di circa 5% che può arrivare all'8% se esposto alla pioggia.

1.3. Le tecniche di riciclaggio

Il fresato viene utilizzato, in aggiunta agli aggregati vergini, bitume ed eventuali additivi, per la realizzazione di nuove pavimentazioni in conglomerato bituminoso. In relazione alle sue proprietà meccaniche, alle caratteristiche che devono avere i vari strati della pavimentazione e in virtù sia delle caratteristiche degli impianti di miscelazione che dei risultati ottenuti dalle ricerche su tale materiale i capitolati e le norme di riferimento prevedono, tendenzialmente, tali percentuali massime di rap da inserire nella miscela:

- Strato di base: 30% RAP
- Binder: 20÷25% RAP
- Strato di usura: 15% RAP

L'inserimento del fresato nella miscela fa sorgere varie problematiche che si vanno a ripercuotere anche nelle modalità di riciclaggio:

- Omogeneità della miscela
- Riscaldamento della miscela
- Riduzione della lavorabilità
- Riduzione delle prestazioni

Le tecniche di riciclaggio che vengono utilizzate si dividono in 2 categorie principali:

- Riciclaggio a caldo
- Riciclaggio a freddo

le quali a loro volta si possono suddividere:

- Riciclaggio in situ
- Riciclaggio in impianto

1.3.1. Riciclaggio a caldo

- RICICLAGGIO A CALDO “IN SITU”

Per definizione tutte le fasi operative previste, dalla rimozione del vecchio conglomerato alla realizzazione della nuova pavimentazione, vengono svolte in cantiere. Le operazioni vengono svolte attraverso vari macchinari che procedono contemporaneamente in sequenza. Il precedente studio della miscela deve tener in conto l’eventuale ulteriore fase di riscaldamento preventiva antecedente l’asportazione del materiale.

Tale tecnica risulta essere molto dispendiosa sia in termini economici che logistici a causa dell’elevato costo e ingombro del cantiere dei macchinari impiegati. Tuttavia la problematica principale che ha portato al progressivo abbandono di tale tecnica è l’aspetto ambientale: infatti, le fasi di asporto del vecchio conglomerato e la miscelazione del nuovo materiale richiedono il preriscaldamento della pavimentazione, e il riscaldamento del bitume e del fresato nella fase antecedente la miscelazione, processi che prevedono entrambi il raggiungimento di elevate temperature (dell’ordine dei 150°) con conseguente produzione di fumo ed emissione nocive.

Figura 1.3 treno di riciclaggio a caldo in situ

- RICICLAGGIO A CALDO “IN IMPIANTO”

In questo caso il conglomerato bituminoso viene realizzato nell’impianto di miscelazione. Negli impianti il fresato viene aggiunto alle altre componenti previste per la miscela del conglomerato bituminoso e in questo caso l’aspetto principale da tenere in considerazione è la modalità e il punto di immissione del RAP: tale scelta causerà una variazione delle modalità, dell’entità e dei tempi di riscaldamento del conglomerato di recupero andando ad influire in definitiva sulle proprietà sia del bitume già ossidato che del bitume vergine. Le possibilità sono quattro ognuna caratterizzata da vantaggi e svantaggi:

- AL PIEDE DELL’ELEVATORE A TAZZE PER GLI INERTI CALDI: tale scelta implica una minima modifica all’impianto di produzione con conseguente basso costo di intervento. Il problema di tale scelta risiede nel dover mettere a contatto aggregati caldi con il fresato a temperatura ambiente il quale causerebbe un rapido raffreddamento degli aggregati e, se presente, condensa di acqua. Inoltre nella torre di miscelazione si dovrebbe sorpassare l’ulteriore fase di vagliatura.
- DIRETTAMENTE NEL MISCELATORE: anche in questo caso, come nel precedente, il vantaggio consiste nel dover apportare una minima modifica all’impianto ma si necessiterebbe di un maggior riscaldamento degli aggregati per evitare un rapido raffreddamento della miscela.
- ESSICCATORE AGGREGATI: in tal caso si opterebbe per l’introduzione diretta del RAP nel tamburo essiccatore rivolto al riscaldamento degli aggregati. Il primo svantaggio è quello di non poter effettuare l’ulteriore fase di vagliatura nella torre di miscelazione, ma il pericolo principale sta nel dover mettere a contatto il RAP con la fiamma dell’essiccatore che causerebbe la bruciatura del bitume. Una possibile soluzione potrebbe essere l’inserimento del RAP nel tratto successivo alla fiamma o in un anello che eviterebbe il contatto con il materiale.
- ESSICCATORE DEDICATO: tale comparto dedicato risulta essere la scelta ottimale in quanto permetterebbe un trattamento separato del materiale di recupero dal materiale vergine. Si tratta però di un importante intervento da apportare all’impianto sia in termini economici che spaziali.

Molto importante anche in questo caso la fase di mix design. Lo studio delle miscele riciclate si basa su due aspetti fondamentali: lo studio granulometrico e il dosaggio del bitume vergine di apporto. La necessità di valutare tali aspetti deriva dal fatto che il fresato, alle elevate temperature, tende a separarsi in

aggregati ricoperti di bitume e bitume. Quindi nella fase della valutazione del mix design bisogna tener conto sia delle caratteristiche granulometriche del fresato (tramite estrazione del bitume), e valutare che siano conformi alle specifiche delle miscele tradizionali, sia delle caratteristiche del bitume che andrà in fusione il quale determinerà la scelta del tipo e del quantitativo di bitume vergine da aggiungere. Gli errori principali indotti da errate valutazioni durante tale fase sono due: ipotizzare una completa miscelazione delle componenti dove parte del RAP si comportasse invece come “black rock”, ovvero come inerte, con conseguente sottostima del bitume da aggiungere; ipotizzare il fresato come inerte senza considerare il bitume in esso presente e quindi ottenere un conglomerato troppo ricco di bitume e molto rigido. In definitiva il fattore fondamentale da valutare è il grado di miscelazione tra i due leganti che va ad influenzare le prestazione del conglomerato finale.

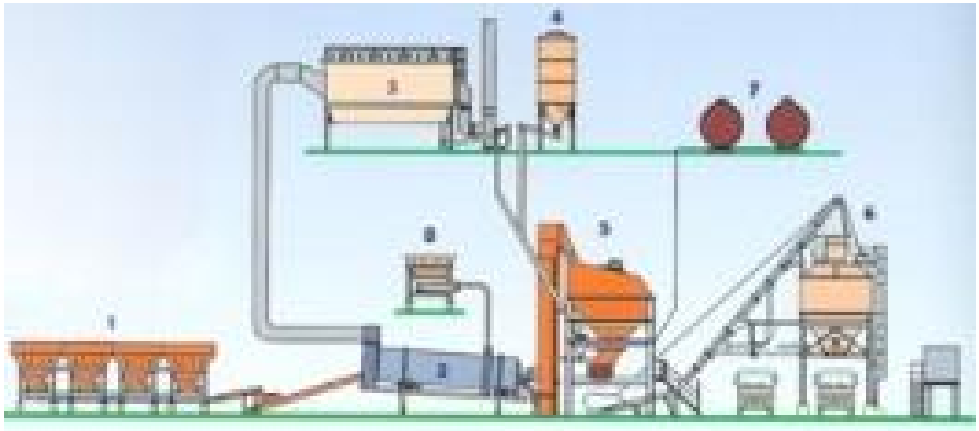


Figura 1.4 impianto produzione conglomerato bituminoso

1.3.2. Riciclaggio a freddo

La tecnica di riciclaggio a freddo sta diventando un’alternativa sempre più utilizzata nell’ambito della manutenzione e rifacimento delle pavimentazioni grazie alla drastica riduzione in termini di oneri sia economici che ambientali. I principali vantaggi sono:

- Riduzione delle emissioni di fumi, polveri e gas prodotti durante la fase di riscaldamento
- Limitato sfruttamento delle risorse ambientali: nel riciclaggio a freddo può essere impiegata una massa dei fresato pari al 100% degli aggregati vergini
- Risparmio economico: sia grazie alla durata garantita delle pavimentazione che risulta equivalente a quelle realizzate con aggregati

vergini, sia grazie al minor utilizzo di combustibili per svolgere le funzioni di riscaldamento e movimentazione dei numerosi macchinari necessari alle produzioni a caldo

- RICICLAGGIO A FREDDO “IN SITU”

Questa tecnica prevede il riutilizzo del materiale proveniente dalla sola demolizione della pavimentazione o può coinvolgere anche strati sottostanti, seconda del tipo di intervento previsto. Tutte le operazioni necessarie vengono svolte da treni ad unità singola o unità multipla. I vantaggi principali rispetto al riciclaggio in impianto risiede nel superamento delle fasi di movimentazione e trasporto dei materiali.

- RICICLAGGIO A FREDDO “IN IMPIANTO”

La produzione in impianto è simile a quella di un misto cementato. Questa alternativa è preferibile in quanto si realizza un controllo più efficace della produzione e si riesce ad ottenere una maggiore omogeneità della miscela attraverso le fase di vagliatura e conseguente suddivisone in classi granulometriche.

Le miscele ottenibili dal riciclaggio a freddo differiscono dalle classiche miscele. In esse sono presenti: il cemento che svolge la duplice funzione di filler e di rompere l’emulsione bituminosa (se utilizzata); la tipologia di legante bituminoso impiegato che a seconda dell’intervento da svolgere può variare dal bitume schiumato, all’emulsione di bitume tal quale o emulsione di bitume modificato; acqua. Lo studio della miscela si basa su quattro fasi fondamentali: determinazione della composizione granulometrica, determinazione del contenuto d’acqua, scelta del tipo di legante (in funzione della destinazione d’uso del materiale prodotto) e determinazione del dosaggio del legante.

1.4. L’invecchiamento del bitume

A partire dall’istante in cui il conglomerato bituminoso abbandona l’impianto di produzione e per tutta la sua vita nella pavimentazione stradale, esso subisce un’importante evoluzione delle sue caratteristiche. Ciò è dovuto in particolare al fenomeno di alterazione che riguarda il legante, noto come invecchiamento del bitume.

Con il termine invecchiamento si vuole raggruppare l’intero complesso di fenomeni strettamente legati all’azione combinata di temperatura e presenza di

ossigeno che portano alla progressiva e irreversibile perdita delle caratteristiche originarie proprie del legante.

Si possono individuare tra principali meccanismi alla base dell'invecchiamento del bitume:

- VOLATILIZZAZIONE: fenomeno che consiste nella perdita delle componenti più leggere del materiale, ovvero caratterizzate da bassi punti di ebollizione. Questo processo arriva quasi al termine già della fase di miscelazione con gli aggregati a causa delle temperature raggiunte.
- OSSIDAZIONE: reazione dell'ossigeno con le lunghe molecole idrocarburiche, anch'essa è favorita dalle elevate temperature ma non si esaurisce nelle fasi di produzione progredendo anche oltre questa fase.
- POLIMERIZZAZIONE: reazione che avviene solo nei bitumi modificati con polimeri; si basa sulla formazione di nuovi legami intermolecolari con conseguente formazione di catene di maggiori dimensioni. Anche la polimerizzazione, come l'ossidazione, è favorita dalle elevate temperature ma non si esaurisce nella fase di produzione del conglomerato bituminoso.

Il fenomeno dell'invecchiamento, quindi, si sviluppa nel tempo e si possono distinguere due fasi:

- Invecchiamento a breve termine
- Invecchiamento a lungo termine

- INVECCHIAMENTO A BREVE TERMINE

Si sviluppa durante le prime fasi della realizzazione della pavimentazione, ovvero produzione della miscela, trasporto al cantiere e messa in opera. In questa fase il bitume, esposto all'azione combinata dell'elevata temperatura e della disponibilità di ossigeno, subirà un processo di irrigidimento dovuto alla combinazione di tutti e tre i meccanismi di invecchiamento sopra indicati.

- INVECCHIAMENTO A LUNGO TERMINE

Riguarda l'intera fase di servizio, dall'apertura al traffico fino al termine della vita utile della pavimentazione. Gli agenti che contribuiscono al fenomeno dell'invecchiamento sono fenomeni meteorici, e in particolare l'acqua, le radiazioni solari e le variazioni di temperatura: inoltre ricoprono un importante ruolo caratteristiche intrinseche alla pavimentazione e al materiale come la posizione dello strato in questione all'interno della pavimentazione, lo spessore

del film di bitume che riveste gli aggregati e il tenore di vuoti che caratterizza la miscela. Durante questa fase i principali meccanismi che agiscono sono ossidazione e polimerizzazione.

1.5. Gli additivi rigeneranti

Gli additivi rigeneranti, che fanno parte del macro gruppo degli additivi per miscele di conglomerato bituminoso, sono sviluppati per migliorare e in particolare ripristinare le proprietà chimico-fisiche del bitume invecchiato contenuto nei conglomerati bituminosi di recupero in modo che la miscela finale non sia eccessivamente penalizzata dalla presenza di RAP. Gli additivi rigeneranti, in genere, hanno caratteristiche che mirano a modificare e migliorare le proprietà di adesione, suscettibilità termica, coesione, viscosità (fluidificanti) e resistenza all'invecchiamento del legante totale.

Ne esistono di numerosi tipi, ognuno dei quali è sviluppato con lo scopo di far fronte ad una o più specifiche carenze del conglomerato bituminoso di recupero. Principalmente si dividono in due grandi categorie: additivi chimici, quindi sviluppati a partire direttamente da molecole e composti sintetizzati in laboratorio, e additivi derivanti da olii minerali. Generalmente questi additivi agiscono apportando, in particolare al bitume invecchiato parte delle frazioni volatili che ha perso durante tutto il processo di invecchiamento.

Ad oggi gli additivi rigeneranti sono una componente fondamentale del mix design, in relazione al fatto che si tende a voler utilizzare sempre più percentuali di conglomerato bituminoso di recupero nelle nuove miscele in vista dei vantaggi sia economici sia ambientali che questo riutilizzo porta con sé.

Per effettuare la scelta idonea, in funzione delle caratteristiche che ci si aspetta dal nuovo conglomerato e del bitume invecchiato con cui abbiamo a che fare, sono necessarie prove di laboratorio. Le prove dovrebbero essere effettuate su più miscele di conglomerato bituminoso caratterizzate ognuna da un determinato additivo, al fine di valutare la miglior compatibilità tra i vari materiali, e ogni additivo dovrebbe essere testato con diversi dosaggi al fine di individuarne la percentuale ottimale.

2. Programma sperimentale

Nel seguente capitolo verranno riportati gli obbiettivi e tutte le fasi della sperimentazione attraverso un'accurata descrizione dei materiali impiegati, della strumentazione impiegata e delle metodologie e protocolli di prova.

2.1. Obbiettivi e elenco delle miscele realizzate

La sperimentazione in questione ricade all'interno del programma sperimentale, avviato dal Dipartimento Strade dell'Università Politecnica delle Marche, sul riciclaggio delle pavimentazioni e più in particolare nel riciclaggio a caldo. Le attività di ricerca, finalizzate alla caratterizzazione e ottimizzazione delle miscele ad elevato contenuto di materiale riciclato (RAP), è svolta in collaborazione con imprese di costruzioni ed enti preposti al fine di affrontare problemi reali riscontrabili durante la fase di produzione e messa in opera.

L'attenzione di questo studio è rivolta a miscele di conglomerato bituminoso contenenti percentuali di fresato pari al 50% in peso della miscela. L'obbiettivo del programma sperimentale, interamente svolto all'interno del Laboratorio Strade dell'Università Politecnica delle Marche, è quello di andare a determinare, inizialmente, le differenze in termini di caratteristiche meccaniche che intercorrono tra una miscela contenente 0% di RAP e una contenente il 50% di RAP per poi proseguire con la caratterizzazione di miscele contenenti 50% RAP ma contenenti ognuna diverse tipologie e quantitativi di additivo. Ottenuti i risultati è stato quindi possibile andar a definire se tali additivi avevano o meno un effetto positivo sulla rigenerazione del bitume ossidato e se su quale caratteristica andavano ad agire.

In totale sono state realizzate e testate 3 tipologie di miscele, riportate schematicamente nella tabella 2.1

MIX n°	% RAP	ADDITIVO
1	0	Nessun additivo
2	50	Nessun additivo
3	50	Additivo tipo "A"

Tabella 2.1 Tabella riassuntiva delle miscele realizzate e testate nella sperimentazione

La sperimentazione si è svolta in quattro fasi principali:

- FASE 1: determinazione della curva granulometrica e percentuale ottimale di bitume in relazione ai riferimenti del Capitolato di ANAS
- FASE 2: preparazione e realizzazione dei provini attraverso l'ausilio di impastatrice e fustella giratoria
- FASE 3: determinazione delle caratteristiche geometriche dei provini e calcolo dei vuoti presenti
- FASE 4: esecuzione delle varie prove al fine di valutare le caratteristiche meccaniche di interesse

2.2. Materiali

In questo paragrafo vengono presi in esame i vari materiali impiegati nello svolgimento di tale sperimentazione. Verrà fornita una descrizione generica dei vari materiali per poi passare ai dettagli relativi alle miscele in questione.

2.2.1. Aggregati calcarei

La prima tipologia di materiale descritto è l'aggregato calcareo, presente in tre diverse pezzature nelle miscele della presente sperimentazione (figura 2.1-2.2)

I calcare è una roccia sedimentaria costituita essenzialmente da calcite, un minerale formato da carbonato di calcio ($CaCO_3$). Gli strati calcarei sono molto diffusi sulla superficie terrestre, rappresentandone un elemento caratteristico anche perché sede, in particolari condizioni climatiche, dello spettacolare fenomeno erosivo carsico. La forma e la giacitura di queste rocce, cioè il modo in cui sono disposte rispetto alla superficie terrestre, risentono delle caratteristiche del loro processo di formazione e di eventuali successivi fenomeni di deformazione. Spesso esse si presentano con stratificazioni anche di notevole estensione, anche se non sono infrequenti affioramenti rocciosi più compatti. I processi di formazione delle rocce calcaree differiscono sostanzialmente per l'origine dei sedimenti costituenti: questi, infatti, possono derivare (calcari organogeni) da gusci o da esoscheletri, cioè dagli scheletri esterni di organismi che vivono nelle acque dei mari e degli oceani. Si possono formare, inoltre, per precipitazione chimica dei sali disciolti in acque sia marine sia continentali e si chiamano, allora, calcari di deposito chimico: è il caso del travertino e dell'alabastro, apprezzate rocce ornamentali che si formano quando acque continentali subiscono forti agitazioni e nebulizzazioni, cioè si disperdono in piccolissime goccioline. Infine possono provenire (calcari clastici o detritici) dalla degradazione di rocce calcaree preesistenti.

L’estrazione di questo materiale avviene prevalentemente in cave lungo corsi d’acqua e sono presenti più o meno in tutte le regioni italiane, e questo rende il calcare uno dei materiali più utilizzati in particolar modo in ambito stradale.

Figura 2.1 Aggregati calcarei (sx: 8/12; dx: 12/16)

Per questa sperimentazione sono state utilizzate due differenti pezzature:

- Calcare 8/12 (tabella 2.1; figura 2.2)
- Calcare 12/16 (tabella 2.2; figura 2.3)

(i rapporti 8/12 e 12/16 fanno riferimento al rapporto d/D dove d è il diametro minimo e D è il diametro massimo)

CURVA GRANULOMETRICA		
d (mm)	g	%P
20	0	100
16	0	100
12.5	0	100
10	223.6	77.64
8	492.7	28.37
4	283.7	0
2	0	0
0.5	0	0
0.25	0	0
0.125	0	0
0.063	0	0
fondo	0	0

Tabella 2.1: calcare 8/12

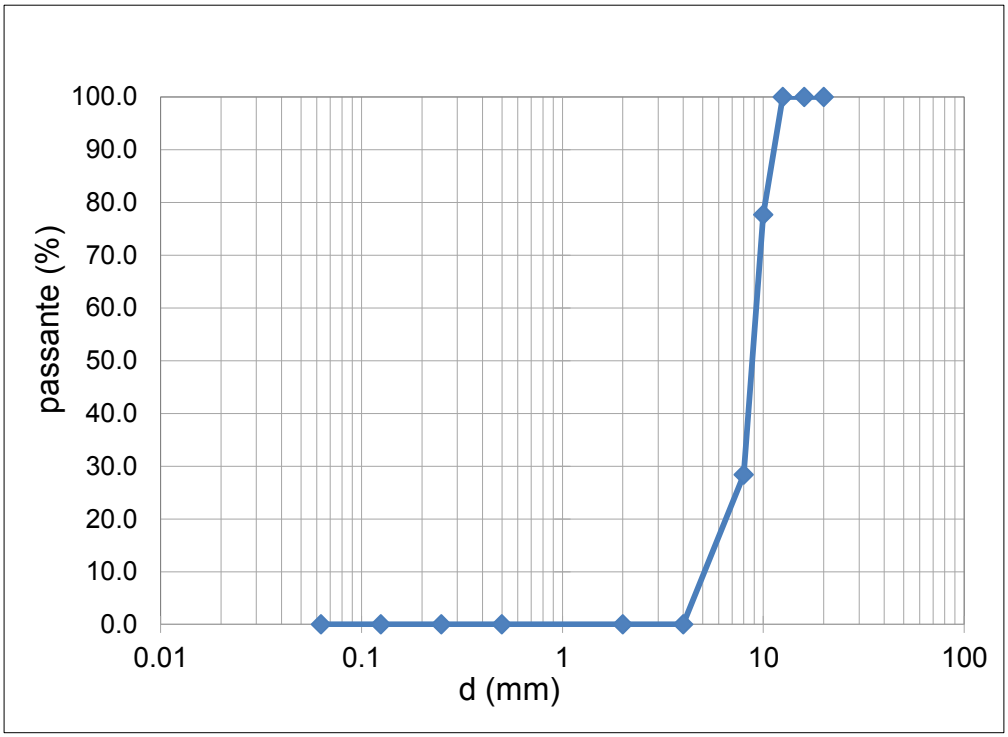


Figura 2.2: curva granulometrica 8/12

CURVA GRANULOMETRICA		
d (mm)	g	%P
31	0	100
20	289.6	80.7
16	563.2	43.1
12.5	519.2	8.5
10	128	0
8	0	0
4	0	0
2	0	0
0.5	0	0
0.25	0	0
0.125	0	0
0.063	0	0
fondo	0	0

Tabella 2.2: calcare 12/16

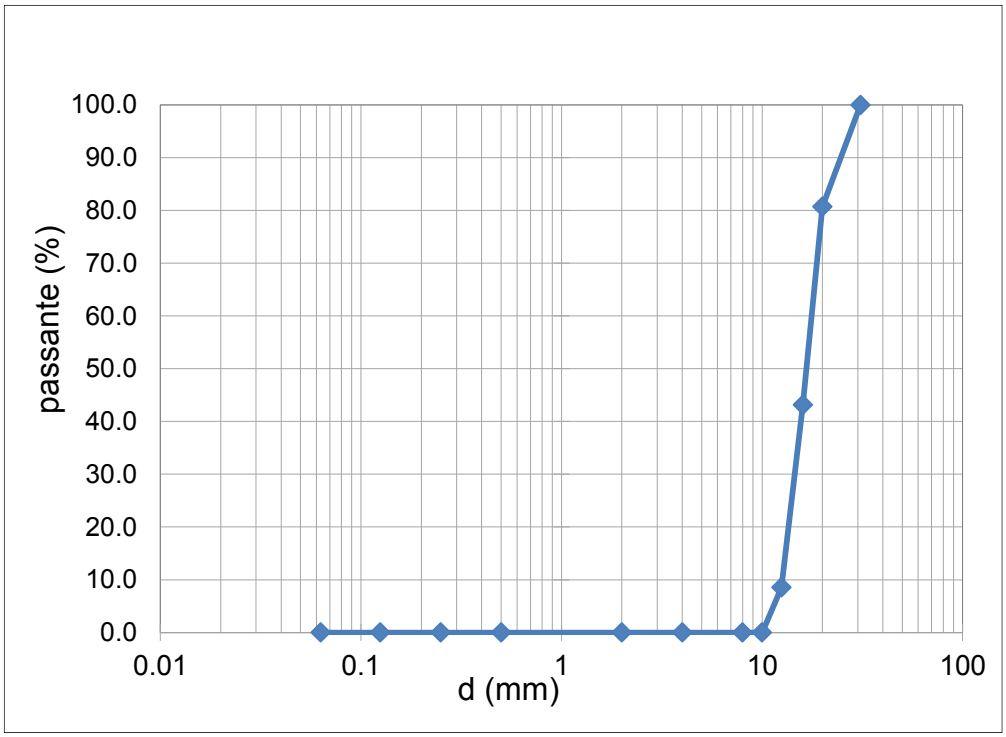


Figura 2.3: Curva granulometrica calcare 12/16

2.2.2. Sabbia calcarea

Nella sperimentazione è stata utilizzata sabbia di origine calcarea

Figura 2.4: Aggregati calcarei (sabbia)

CURVA GRANULOMETRICA		
d (mm)	g	%P
20	0	100
16	0	100
12.5	0	100
9.5	0	100
8	0	100
4	74.7	92.5
2	321.1	60.4
0.5	378.8	22.5
0.25	65.5	16
0.125	41.7	11.8
0.063	25.9	9.2
fondo	92.3	0

Tabella 2.3: sabbia calcarea 0/6

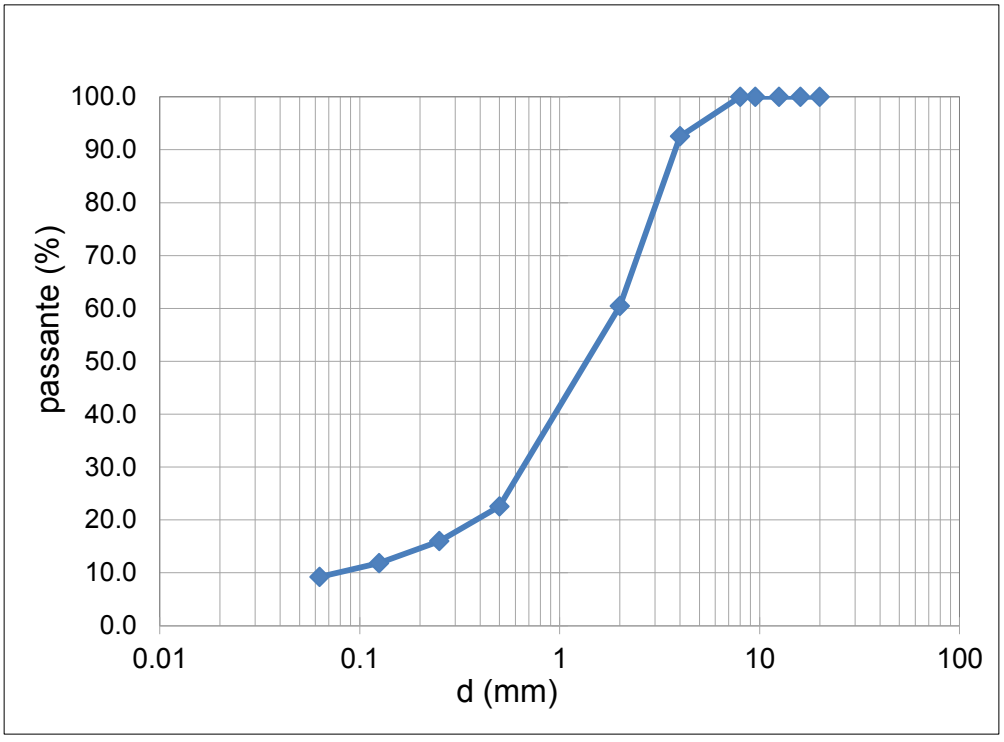


Figura 2.5: curva granulometrica sabbia calcarea 0/6

2.2.3. Filler di recupero

Con il termine filler viene indicata quella frazione di aggregato di dimensioni ridottissime. Può derivare sia da produzione industriale mirata ma è ottenibile anche dalla frantumazione e abrasione della superficie di aggregati i quali tendono ad urtarsi reciprocamente durante le fasi di lavorazione e movimentazione. Generalmente viene impiegato come riempitivo, infatti viste le dimensioni permette una riduzione della percentuale di vuoti nei conglomerati artificiali. Viene impiegato in molti campi dell'ingegneria e in particolare nel confezionamento di malte, e conglomerati sia cementizi che bituminosi. Per quanto riguarda i conglomerati bituminosi oltre al miglioramento dal punto di vista dei vuoti, l'inserimento del filler porta vantaggi anche in termini di miglioramento dell'adesione del bitume all'aggregato e ad un miglioramento delle proprietà meccaniche del bitume.

A seconda della norma che si prende come riferimento per filler si intende un materiale con dimensioni leggermente differenti: la CNR 139 definisce come filler la frazione di aggregato passante al setaccio 0,075 mm mentre la UNI EN 933-1 la frazione passante allo 0,063 mm.

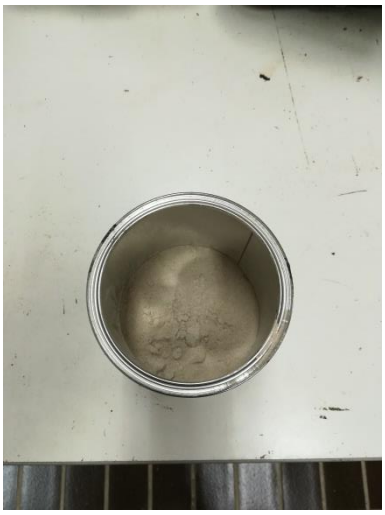


Figura 2.6: filler di recupero

Nella tabella 2.4 e nella figura 2.7 vengono riportate rispettivamente la distribuzione granulometrica e la curva granulometrica caratterizzanti il filler utilizzato nella sperimentazione

CURVA GRANULOMETRICA		
d (mm)	g	%P
20	0	100
16	0	100
12.5	0	100
9.5	0	100
8	0	100
6.3	0	100
4	0	100
2	2	99
1	6	96
0.5	9.2	91.4
0.25	10.6	86.1
0.063	33.2	69.5
fondo	139	0

Tabella 2.4: filler di recupero

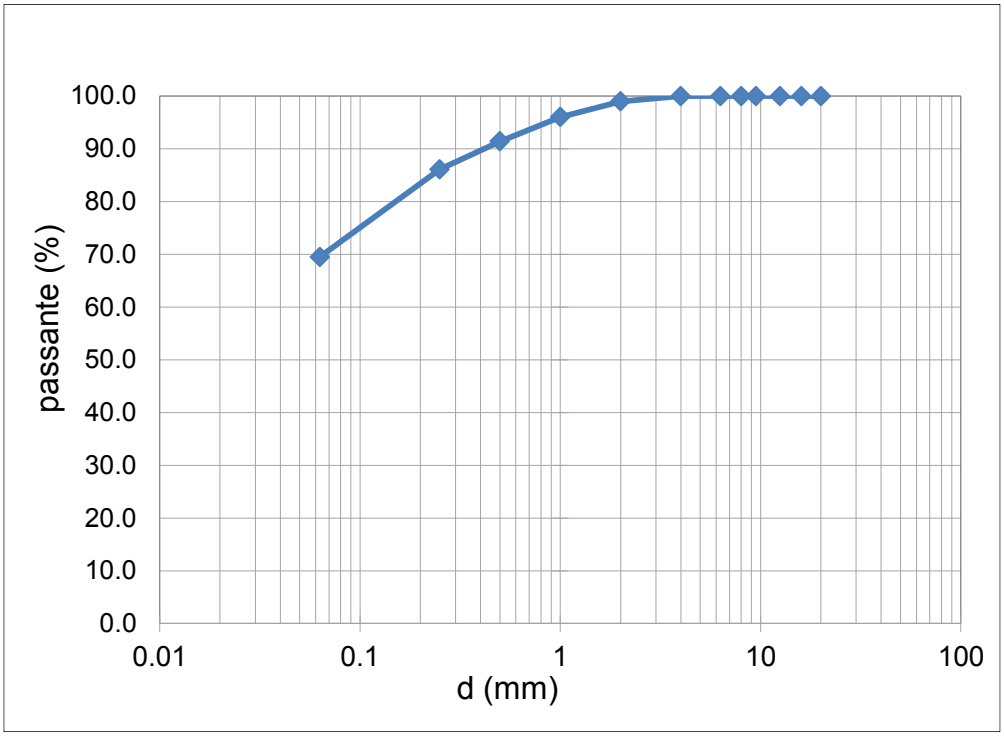


Figura 2.7: curva granulometrica filler di recupero

2.2.4. RAP

Il RAP impiegato nella sperimentazione è un materiale proveniente da un impianto di produzione di conglomerati bituminosi locale e deriva da fresature di strade della zona.

Nella miscela sono state impiegate due pezzature:

- RAP fino
- RAP grosso

Tale distinzione è dovuta ad un diverso trattamento subito dal materiale: per quanto riguarda il RAP grosso si tratta del materiale derivante direttamente dalla fase di fresatura mentre per ottenere il RAP fino, il fresato è stato sottoposto ad una ulteriore fase di frantumazione in impianto

La caratterizzazione dei due materiali è stata effettuata attraverso l'analisi granulometrica degli aggregati contenuti nel RAP previa estrazione di bitume.

Figura 2.8: RAP fino (in basso) e grosso (in alto)

Nella tabella 2.6 e nella figura 2.9 vengono riportate rispettivamente la distribuzione granulometrica e la curva granulometrica degli aggregati contenuti nel RAP fino; nella tabella 2.7 e nella figura 2.10 vengono riportate rispettivamente la distribuzione granulometrica e la curva granulometrica degli aggregati contenuti nel RAP grosso;

CURVA GRANULOMETRICA		
d (mm)	g	%P
31	0	100
20	0	100.0
16	0	100.0
12.5	0	100.0
10	13.3	98.6
8	32.9	95.1
4	270.7	66.7
2	220.1	43.6
1	133.4	29.6
0.5	84.5	20.7
0.25	59.1	14.5
0.063	73.9	6.7
fondo	64.00	0

Tabella 2.6: RAP fino

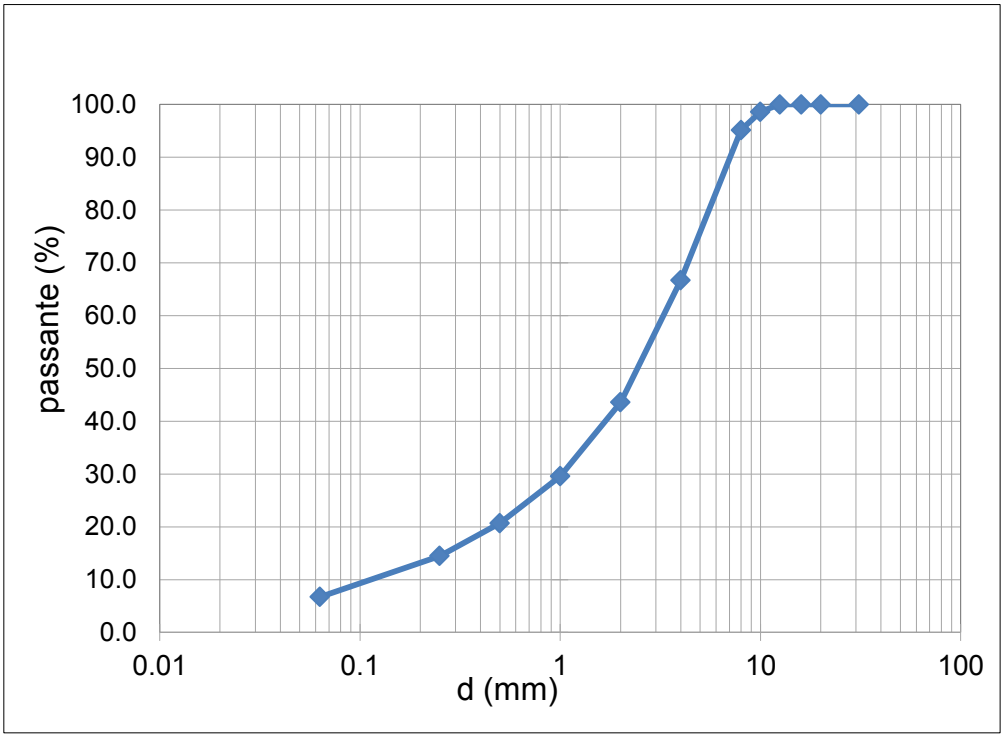


Figura 2.9: curva granulometrica RAP fino

CURVA GRANULOMETRICA		
d (mm)	g	%P
31	0	100.0
20	0	100.0
16	0	100.0
12.5	14.3	98.5
10	124	85.4
8	97.5	75.2
4	251.5	48.6
2	156.2	32.2
1	96.1	22.1
0.5	66.5	15.0
0.25	42.6	10.6
0.063	60.1	4.2
fondo	40.10	0

Tabella 2.7: RAP grosso

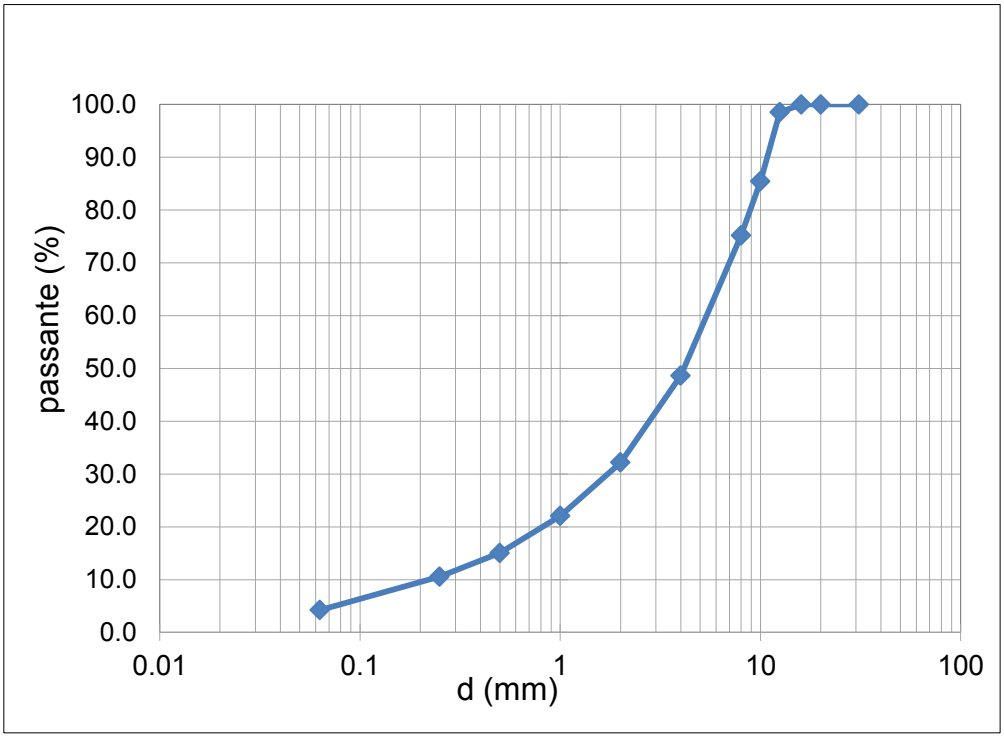


Figura 2.10: curva granulometrica RAP grosso

2.2.5. Bitume 50/70

Il bitume impiegato nella miscela di conglomerato bituminoso è un bitume vergine 50/70 proveniente da un impianto di produzione di conglomerato bituminoso locale.

La sigla composta da due numeri, in questo caso 50/70, per un bitume viene impiegata per effettuare una caratterizzazione/classificazione del legante basata su prove di carattere empirico normalizzate. Nello specifico la prova da cui si ricavano questi numeri è la prova di penetrazione.

2.2.6. Additivo Rigenerante

L'additivo scelto per la miscela in questione è un additivo a base di olio minerale caratterizzato da una molecola studiata appositamente per rigenerare le caratteristiche del bitume invecchiato presente nel RAP. Nella presente sperimentazione il quantitativo di additivo utilizzato è pari al 3% sul bitume totale (bitume vergine + bitume derivante dal RAP).

Figura 2.11: additivo rigenerante

2.3. Apparecchiature e protocolli di prova

In questo capitolo verrà descritta e commentata la fase esecutiva della sperimentazione effettuata. Verranno analizzate per esteso tutte le fasi del programma di indagine, le strumentazioni adoperate e i rispettivi protocolli di prova a cui si è fatto riferimento dalla realizzazione dei provini alla analisi strumentale finale.

Sono stati realizzati complessivamente tre impasti di cui il primo contenente 0% RAP mentre gli altri due contenenti entrambi 50% RAP ma con la differenza che nel secondo è stato impiegato l'additivo rigenerante. Per ognuna delle tre miscele sono stati realizzati 18 provini cilindrici di diametro 100 mm e altezza variabile nell'intorno dei 60 mm, realizzati attraverso due impasti separati per motivi logistici.

2.3.1. Miscelazione e compattazione delle miscele

Dopo aver pesato opportunamente i vari componenti della miscela (aggregati, sabbia, filler, RAP, bitume e se presente l'additivo) nel rispetto dei quantitativi determinati attraverso il mix-design, il tutto è stato miscelato attraverso l'ausilio di un miscelatore meccanico (figura 2.12).

Figura 2.12: miscelatore meccanico in dotazione al laboratorio

L'impastatrice in dotazione al laboratorio può essere vista come costituita di due parti, una inferiore e una superiore. Nella parte inferiore è posizionato un recipiente di acciaio in cui vengono inseriti i materiali costituenti le miscele che dovranno essere mescolati. Il recipiente è collegato ad un semi-anello in

metallo che, all'incirca a metà altezza, lo avvolge per metà della circonferenza ed è unito ad esso tramite due cerniere che permettono una rotazione introno al proprio asse in modo da rendere più agile l'estrazione del conglomerato presente all'interno. Questo anello è a sua volta agganciato alla struttura portante dell'impastatrice tramite un carrello che, attraverso una apposita guida, permette il sollevamento o l'abbassamento del recipiente. Poiché per la produzione del conglomerato bituminoso si devono raggiungere determinate temperature (a seconda della tecnica di produzione) il recipiente, sul fondo, è dotato di una resistenza interna che permette di mantenere la temperatura richiesta. Nella parte superiore del macchinario invece sono presenti: la doppia pala, sagomata in funzione del recipiente sottostante in modo da ottenere una miscelazione ottimale ed omogenea, collegata in testa al macchinario tramite un particolare anello che, se necessario, ne permette l'estrazione; una griglia semicircolare di protezione che ruota intorno al recipiente sottostante in modo da poter essere aperta, durante l'immissione di componenti della miscela, e chiusa, durante la miscelazione (se la griglia è aperta il macchinario non entra in funzione); infine è presente il quadro strumentato che permette la messa in funzione dell'impastatrice, le varie manovre che può effettuare e la regolazione della temperatura.

Tutte le miscele sono state realizzate mediante la stessa procedura in modo tale da ottenere una standardizzazione dal punto di vista produttivo evitando variabilità che potrebbero aver compromesso il risultato finale. La procedura è la seguente:

- Si pesano le varie componenti della miscela, aggregati, RAP (se presente) e bitume, per la realizzazione dei provini in conglomerato bituminoso (figura 2.13)

Figura 2.13: pesatura aggregati

- Dopo aver preriscaldato il forno (foto 2.14) a 170° sono messi a riscaldare per 3 ore, in modo da eliminare completamente l'umidità presente in essi, gli aggregati vergini e il RAP

Figura 2.14: forno

- Ad un'ora dall'estrazione degli aggregati e del fresato dal forno vi viene inserito anche il bitume in modo tale da renderlo fluido per la miscelazione
- Si pesa l'additivo rigenerante da aggiungere alla miscela (figura 2.15).

Figura 2.15: additivo rigenerante pesato

- Mezz'ora prima dell'estrazione dei materiali dal forno, si estrae la lattina contenente il bitume e, evitando il raffreddamento di quest'ultimo attraverso l'ausilio di un fornellino elettrico, si aggiunge l'additivo al

bitume vergine e lo si miscela tramite un miscelatore a pale elettrico (figura 2.16). Terminata i due minuti necessari alla miscelazione si posiziona nuovamente il bitume all'interno del forno

Figura 2.16: miscelatore e pale e fornellino elettrico

NOTA: le due fasi precedenti, riguardanti l'aggiunta dell'additivo rigenerante al bitume, sono state svolte esclusivamente per la realizzazione della terza miscela, ovvero quella caratterizzata dalla presenza di additivo rigenerante

- Concluse le 3 ore vengono inseriti gli aggregati (figura 2.17), ad esclusione del filler, e il RAP all'interno del miscelatore: il miscelatore è stato acceso precedentemente in modo che al momento della miscelazione il recipiente sia alla temperatura di miscelazione di 170° C. Dopo un paio di minuti di miscelazione viene aggiunto il bitume e si procede per ulteriore due minuti con la miscelazione.

- Terminata la seconda fase di miscelazione viene aggiunto il filler all'impasto (figura 2.18) e si procede con l'ultima fase di miscelazione.

Figura 2.17: inserimento degli aggregati all'interno del recipiente del miscelatore

Figura 2.18: aggiunta del filler all'impasto

- Terminata anche l'ultima fase della miscelazione si estrae il conglomerato bituminoso dal recipiente dell'impastatrice e lo si va a suddividere in varie teglie. Questa operazione permette la velocizzazione della fase successiva, ovvero la realizzazione dei provini, in quanto attraverso l'ausilio di una bilancia si andrà a mettere in ognuna delle teglie la quantità strettamente necessaria alla realizzazione di un provino. Inoltre, dopo aver suddiviso il materiale nelle varie teglie, lo si ripone nuovamente in forno per un tempo tale che il conglomerato raggiunga nuovamente la temperatura di miscelazione (170°C): quest'ultimo passaggio è mirato all'emulazione del processo di stoccaggio del conglomerato bituminoso nei vari macchinari prima che esso venga steso sulla pavimentazione stradale.

- Successivamente ai 30 minuti di riscaldamento del materiale, vengono prelevati singolarmente le varie teglie e il materiale viene versato all'interno delle fustelle in acciaio utilizzate per formazione dei provini nella pressa a taglio giratoria, preventivamente posizionate anch'esse in forno alla temperatura di 170°C in modo tale da evitare shock termici nel materiale durante la fase di compattazione.

2.3.1.1. Pressa a taglio giratorio (UNI EN 12697-31)

La pressa a taglio giratorio (Gyratory Shear Compactor), introdotta dai tecnici dell'U.S. Army Corps of Engineers negli anni '30, fece la sua comparsa in Europa negli anni '50 per poi essere normata nel 1972. Questa macchina e il suo principio di funzionamento hanno rappresentato un'importante innovazione nelle tecniche di costipamento di conglomerati bituminosi in laboratorio.

Figura 2.19: pressa a taglio giratorio

Il metodo basato sulla pressa a taglio giratorio coniuga i vantaggi della semplicità esecutiva con l'esigenza di riprodurre condizioni di addensamento rappresentative di quelle reali: infatti con i metodi che si utilizzavano in precedenza, basati esclusivamente su un'azione di tipo impulsivo e verticale, si ottenevano condizioni di addensamento ben lontane da quelle che si verificano in sito durante la rullatura.

Il principio di base consiste nel sottoporre il materiale all'azione combinata di una pressione normale, applicata per mezzo di un pistone a comando idraulico,

e di una sollecitazione di taglio, generata per effetto della rotazione della fustella stessa intorno al proprio asse verticale: questa accoppiata di sollecitazioni permette di simulare il meccanismo di compattazione della miscela prodotto dall'avanzamento dei rulli in situ che porta ad una progressiva riorganizzazione delle particelle attraverso movimenti di traslazione e rotazione reciproci.

I provini che si ottengono sono di forma cilindrica caratterizzati da un diametro pari a quello della fustella utilizzata per la compattazione: la norma UNI EN 12697-31 prevede l'impiego di fustelle di diametro 100mm (figura 2.19), 150mm e 160 mm.

Il processo di costipamento avviene attraverso l'applicazione di una pressione costante verticale che può variare a seconda delle sperimentazione, ma in condizioni standard generalmente si applica una pressione di 600 kPa. La rotazione della fustella, che ruota ad una velocità di 30 giri/min, è assicurata da un motore elettrico e un sistema di cuscinetti accoppiati che fungono anche da guida. Inolotre la fustella ruota con un angolo di inclinazione rispetto al prorpio asse verticale di ,25°.

Figura 2.20: fustella pressa a taglio giratorio diametro 100 mm

Tonando alla procedura di realizzazione dei provini, terminata la fase di ulteriore riscaldamento di 30 minuti si procede in questo modo:

- Estrazione della fustella e di una teglia dal forno
- Inserimento sul fondo della fustella di un filtro di carta

- Inserimento del materiale estratto dal forno nella fustella (1100 g) avendo cura di sistemare in maniera abbastanza omogenea il materiale all'interno della fustella tramite una bacchetta di metallo
- Inserire un ulteriore filtro di carta al di sopra del materiale (è opportuno scrivere su di esso le principali caratteristiche del materiale impiegato e il numero del provino in questione per evitare errori nelle fasi successive)
- Chiudere la fustella attraverso l'inserimento della base superiore e riporre la fustella all'interno della pressa
- Al termine del processo di costipamento estrarre il provino attraverso un apposito estrattore (figura 2.20) e lasciare raffreddare il provino per evitare danneggiamenti durante le fasi di movimentazione.

Figura 2.21: estrattore per provini da fustelle

NOTA: lo svolgimento di tutte le fasi dall'estrazione del conglomerato dal forno all'inserimento della fustella nella pressa deve essere svolto nel più breve tempo possibile per evitare che il materiale si raffreddi eccessivamente.

2.3.2. Determinazione delle proprietà volumetriche

Gran parte delle proprietà prestazionali dei conglomerati bituminosi sono direttamente correlate alla loro conformazione interna, che può essere espressa in termini di rapporti volumetrici tra le diverse fasi componenti: fase solida, ovvero aggregati, legante e gassosa, ovvero aria.

Il seguente paragrafo è rivolto ad elencare e alla definizione dei protocolli di prova, impiegati in questa sperimentazione, per il calcolo delle proprietà volumetriche delle tre miscele prodotte.

I risultati di tali elaborazioni verranno poi riportate nel capitolo 3 dove verranno analizzati i risultati delle varie prove effettuate.

- *Determinazione massa volumica massima (UNI EN 12697-5)*

Per massa volumica massima di un conglomerato bituminoso si intende la massa per unità di volume senza vuoti d'aria ad un temperatura nota. In riferimento alla norma UNI EN 12697-5, la massa volumica massima ρ_m è stata valutata con il procedimento C (procedimento matematico):

$$\rho_m = 100/((p_a/\rho_a)+(p_b/\rho_b))$$

dove:

- ρ_m = massa volumica massima [kg/m^3]
- p_a = percentuale di aggregati nella miscela [m/m]
- ρ_a = massa volumica apparente degli aggregati [kg/m^3]
- p_b = percentuale di legante nella miscela [m/m]
- ρ_b = massa volumica del legante a 25°C [kg/m^3]

- Massa volumica apparente geometrica

Per massa volumica apparente si intende la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di un provino a temperatura nota. Per valutare la massa volumica apparente geometrica è stata applicata la procedura D della normativa UNI EN 12697-6: tale procedura prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco. La massa volumica geometrica dei provini cilindrici si calcola:

$$\rho_{b,geom} = m_1/(h \cdot d \cdot (\pi/4))$$

dove:

- $\rho_{b,geom}$=massa volumica apparente del provino [kg/m^3]
- m_1 = massa del provino [g]
- h = altezza media del provino [mm]
- d = diametro del provino [mm]

➢ Determinazione volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)

La determinazione delle proprietà volumetriche delle miscele studiate è stata basata sul contenuto dei vuoti residui dei provini compattati in relazione a quanto prescritto nella norma UNI EN 12697-8:

$$V_m = 100*(\rho_m - \rho_b)/ \rho_m$$

dove:

- ρ_m = massa volumica massima [kg/m^3]
- ρ_b = massa volumica del legante a 25°C [kg/m^3]

2.3.3. Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM)

La prima fase di caratterizzazione meccanica, di questa sperimentazione, svolta sulle tre miscele di conglomerato bituminoso è stata mirata alla misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta.

Per effettuare questa misurazione, e anche la prova di cui si discuterà nel successivo paragrafo(anche se con una differente configurazione del macchinario) è stata impiegata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester).

- Il NAT è un'apparecchiatura utilizzata nei laboratori mirata alla determinazione delle principali caratteristiche meccaniche dei conglomerati bituminosi. In particolare le principali prove in cui impiegata tale apparecchiatura sono:

➢ Determinazione del modulo di rigidezza elastica
➢ Determinazione del modulo resiliente
➢ Resistenza a fatica

- Resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti

Figura 2.22: esempio NAT

Uno degli elementi principali del NAT è la cella di carico (figura 2.22). E' collegata al pistone che permette di l'applicazione del carico alla testa di carico che è a contatto sul provino e può supportare carichi di 20 kN. Inoltre la cella di carico è anche collegata al computer attraverso il quale si possono sia registrare i dati ma anche controllare le modalità di svolgimento della prova andando a regolare il funzionamento della cella di carico. Inoltre la cella di carico a sua volta è posta a contatto con un sistema di contrasto che impedisce il movimento a tutto l'apparato di carico durante la fase di prove. Per la regolazione della posizione del pistone, che sarà effettuata in funzione delle dimensioni del provino testato, io sistema di contrasto è collegato rigidamente a delle viti che ne permettono lo scorrimento verso l'alto o verso il basso (figura 2.23).

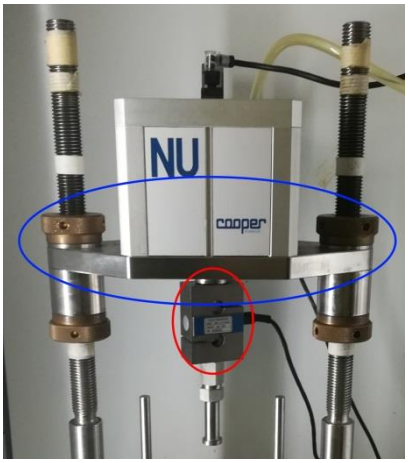


Figura 2.23: sistema di contrasto e viti di regolazione (cerchiate in blu);

cella di carico (cerchiata in rosso)

Il macchinario inoltre ha in dotazione dei castelletti su cui devono essere poggiati i provini durante l'esecuzione della prova. Per effettuare correttamente le prove, a seconda della prova che si vuole effettuare, devono essere impiegati appositi apparati (figura 2.24) i quali permettono il corretto posizionamento del provino.

Figura 2.24: castelletto per posizionamento provini

Gli apparati volti all'alloggiamento del provino sono anche impiegati per il posizionamento dei trasduttori (figura 2.25), i quali sono strumenti collegati al computer che consentono il rilevamento ad elevata precisione degli spostamenti conseguenti all'applicazione di una sollecitazione sul provino.

Figura 2.25: trasduttore per misurazioni deformazione

Inoltre tutta l'apparecchiatura descritta, a sua volta, è contenuta in una camera climatica che permette di regolare e determinare le condizioni al contorno (temperatura) a cui si sta svolgendo la prova.

NOTA: dopo questa breve descrizione in linea generale del NAT si torna a parlare della determinazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta.

In generale la prova per la misurazione ITSM consiste nell'applicazione di una sollecitazione di compressione in una direzione e misurare la deformazione tramite i trasduttori nella direzione opposta. Nella sperimentazione in questione, al fine di misurare il modulo di rigidezza è stata presa come riferimento la norma UNI EN 12697-26 e la prova è stata effettuata a deformazione controllata.

Le prove, eseguite su 4 differenti provini per ogni impasto di conglomerato bituminoso, sono state eseguite andando ad effettuare le varie misurazioni su due diametri per ogni provino (i due diametri devono essere perpendicolari tra loro).

In questa prova il modulo di rigidezza dei provini è legato alla geometria del provino, alla temperatura a cui si effettua la prova, alla deformazione orizzontale, al rise time e al coefficiente di Poisson. Attraverso il rispetto delle specifiche di prova è possibile ritenere valide le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo che permettono l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare.

E' possibile quindi andare a descrivere lo stato tensionale del provino, in termini di tensioni medie e massime, in corrispondenza del diametro orizzontale attraverso le seguenti relazioni:

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

$$\sigma_{y,media} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

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

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

dove:

- P= carico applicato
- d= diametro medio del campione
- t= spessore del campione

Andando a definire la deformazione orizzontale del provino come

$$\varepsilon_x = (\sigma_{x,media}/E) - \nu(\sigma_{y,media}/E)$$

sostituendovi le espressioni delle tensioni medie ricavate precedentemente, e moltiplicando la deformazione orizzontale lungo x per il diametro d si ottiene la deformazione orizzontale Δ

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

da cui è possibile ricavare il modulo elastico

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

Inoltre la versione del software in dotazione al computer del laboratorio permette anche la definizione di un modulo corretto attraverso un fattore AF (adjustement factor) che permette di tenere in conto della forma dell'onda di carico impostata.

Per far si che la prova eseguita possa definirsi corretta, le curve di carico e di deformazione ottenute devono risultare il più regolari possibili ed in particolare: i tempi di picco devono rientrare all'interno del margine di tolleranza di ±4 ms, mentre la deformazione entro i 5,0±0,2 μm.

Le principali variabili che vanno ad influenzare il modulo sono:

- Temperatura: a causa della suscettibilità termica del materiale in questione, per adottare l'ipotesi di materiale isotropo è necessario che la

temperatura si trovi al di sotto dei 25°C; questa prova è stata svolta per tutte e tre le miscele a 20°C

- Rise-time (tempo di picco): a causa della natura viscoelastica del legante la risposta meccanica del materiale in questione dipende direttamente dal tempo di applicazione del carico
- Numero di colpi di condizionamento iniziali: in questa sperimentazione sono stati applicati 10 colpi iniziali di assestamento; questo numero è stato determinato attraverso prove sperimentali che hanno dimostrato essere più opportuno rispetto ai 5 proposti dal British Standard Institute. I colpi di assestamento oltre a permettere un corretto assestamento delle barre sulla superficie di carico del provino, permettono anche di effettuare operazioni di taratura prima della prova vera e propria.

Ora si andranno ad illustrare schematicamente la procedura di realizzazione della prova.

Il software in dotazione al laboratorio permette di tenere sotto controllo e gestire tutte le singole fasi della prova. Successivamente al posizionamento del provino all'interno del macchinario che esegue la prova si passa alla gestione del macchinario dal computer. La prima fase consiste nell'inserimento dei dati geometrici, relativi al provino, e meccanici relativi al materiale nella schermata iniziale successiva all'apertura del programma.

I dati richiesti sono i seguenti:

- Test Temperature
- Specimen Diameter (diametro medio del provino sottoposto al test)
- Specimen Thickness
- Poisson's Ratio
- Target rise-time
- Target horizontal deformation
- Number of conditioning pulses

Completata la compilazione di questi dati e aver denominato il file dati, si procede passando alla schermata successiva. Questa finestra permette di regolare il contatto del pistone con la barra di carico posta al di sopra del castelletto che permette il trasferimento del carico al provino. La fase di messa in posizione del pistone è eseguita automaticamente dal software.

Procedendo si passa alla schermata successiva: in questa fase si va a lavorare sul posizionamento dei trasduttori. La posizione dei trasduttori va regolata attraverso le due viti presenti nel rettangolo metallico che contiene il provino.

Andando ad agire su queste due viti, una per trasduttore, si andrà ad allontanare o avvicinare il trasduttore: la posizione corretta verrà raggiunta quando le due freccette presenti nel monitor diventeranno rosse.

Conclusa questa fase di regolazione del macchinario, si passa alla fase successiva che consiste nell'applicazione, da parte della macchina, dei 10 impulsi di precarico. Questo processo, con grafico e dati relativi, è visualizzato in diretta nel monitor.

Successivamente alla fase di precarico si passa alla schermata finale (figura 2.28) in cui vengono proposti per tutti e 5 gli impulsi di prova i grafici e dati relativi e inoltre vengono riportati i valori medi e calcolati i valori corretti dei moduli. Tutto questo processo deve essere svolto per due volte per ogni provino, ovvero una volta per ogni diametro.

2.3.4. Prova di rottura a trazione indiretta (ITS)

La configurazione di trazione indiretta viene anche utilizzata per prove di rottura di tipo classico. Nota anche come prova Brasiliana, consiste nell'applicazione di un carico di compressione, lungo un diametro verticalmente, che viene fatto variare in modo monotòno con una predefinita velocità di spostamento. Nel provino la rottura si manifesta tramite una fessura che corre diametralmente al provino lungo la stessa direzione di applicazione del carico: si chiama di trazione indiretta in quanto la sollecitazione che porta a rottura il provino, per effetto Poisson, è la trazione che si genera in direzione perpendicolare alla direzione di carico.

Nella prova viene calcolata la resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strenght) ovvero la massima trazione applicata al provino. Noto il carico P l'ITS è pari a

$$\text{ITS} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d}$$

dove:

- P = P_{max} = carico massimo [N]
- t = altezza media del provino [mm]
- d = diametro del provino [mm]

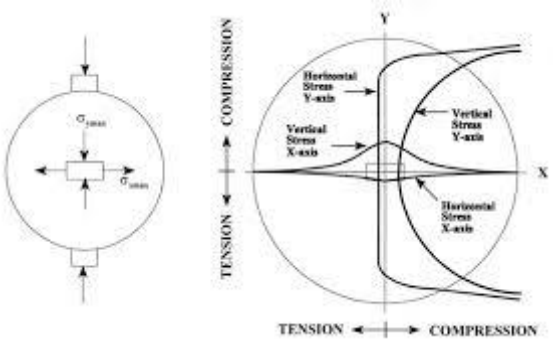


Figura 2.26: stato tensionale provino trazione indiretta

Il macchinario utilizzato nella trazione indiretta (figura 2.27) è costituito da un sistema di carico, caratterizzato da due elementi appositamente sagomati per aderire alla superficie cilindrica, che può essere considerato infinitamente rigido. Il carico sul provino è applicato attraverso la testa di carico inferiore che scorrendo verso, l'alto attraverso due apposite guide, e trovando un contrasto rigido nella parte superiore va a caricare il provino comprimendolo lungo un diametro. I due elementi sagomati uniti alle teste di carico sono caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

- larghezza = 15 mm
- spessore = 4 mm
- lunghezza > altezza del provino

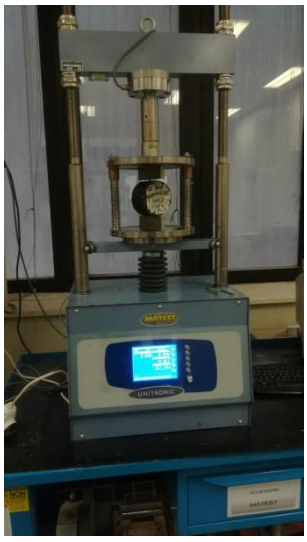


Figura 2.27: macchinario prova trazione indiretta

Figura 2.28: provino rotto prova a trazione indiretta

Una volta collocato il provino in maniera centrata sui listelli ed aver avviato il software si vanno ad immettere i parametri richiesti nella schermata principale. A questo punto si aziona la macchina: il sistema di carico inferiore inizia ad avanzare ad una velocità di circa 50 mm/min e si arresta automaticamente quando registra una riduzione del carico massimo del 20%. La prova, come previsto dalla norma UNI EN 12697-23, avviene in controllo di deformazione; per misurare la deformazione subita dal provino durante tutto il percorso di carico, il sistema di controllo è dotato di due comparatori (uno impiegato nella misura della deformazione verticale e uno per la deformazione orizzontale).

La prova in questa sperimentazione è stata svolta alla temperatura di 25°C: il condizionamento dei provini è stato effettuato attraverso una camera climatica in cui sono stati riposti provini per 3 ore.

Per le tre miscele la determinazione dell'ITS è stata svolta sui 4 provini che sono stati utilizzati anche nello svolgimento della prova precedente.

2.3.5. Prova a fatica (ITF)

L'ultima fase di caratterizzazione meccanica, di questa sperimentazione, svolta sulle tre miscele di conglomerato bituminoso è stata mirata alla determinazione della resistenza a fatica del materiale.

La resistenza a fatica di un materiale è la resistenza che esso sviluppa a carichi di intensità inferiore al carico che porterebbe ad una rottura immediata del materiale ma che ripetuti ciclicamente con una determinata frequenza e per un determinato periodo portano al collasso del provino. Questa tipologia è molto importante per analizzare le caratteristiche del conglomerato bituminoso in

quanto permette una simulazione abbastanza fedele dei carichi veicolari che andranno a sollecitare ciclicamente la pavimentazione in esercizio.

La prova a fatica è stata sviluppata sui restanti 14 provini di ogni miscela, facendo riferimento alla norma UNI EN 12697-24. Prima di procedere con la prova a fatica il provino deve essere condizionato, ovvero posto all'interno di una camera climatica per almeno 8 ore in modo tale che raggiunga la temperatura a cui deve essere effettuata la prova; in questo caso 20°C. Il macchinario utilizzato per lo svolgimento della prova a fatica è il NAT.

I parametri principali ottenibili dalla prova possono essere determinati come segue:

$$\sigma = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot \Omega}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{2 \cdot \Delta H}{\Omega}\right) \cdot \left[\frac{1 + 3\nu}{(\pi \cdot \nu) + 4 - \pi}\right]$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{\Delta H}{\Omega}\right) \cdot 2{,}1$$

$$S = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right) \cdot (1 + 3\nu)$$

dove:

- σ = tensione sull'asse principale del provino [MPa]
- P = carico misurato [N]
- t = altezza del provino [mm]
- Ω = diametro del provino [mm]
- ε = deformazione orizzontale [μm/m]
- ΔH = deformazione orizzontale [mm]
- v = coefficiente di Poisson (=0,35)
- S = modulo di rigidezza del materiale [MPa]

La prova ITF (figura 2.29) consiste nell'applicazione di un carico impulsivo di durata 0,1 secondi ad intervalli di 0,4 secondi. Si inizia con un determinato livello di carico e se la deformazione successiva ai primi 10 cicli non rientra nell'intervallo 100 a 400 μm/m la prova deve essere interrotta e il carico modificato. Una volta determinato il carico di partenza, lo studio prevede la realizzazione di una serie di prove andando a variare il carico con valori di ± 50/100 kPa rispetto al carico iniziale. Generalmente vengono definiti tre livelli di carico per svolgere la prova e per ottenere un valore medio attendibile, per ogni livello di carico, dovrebbero essere testati minimo tre provini e se necessario (ad esempio se un risultato risulta essere completamente fuori tendenza) testarne altri.

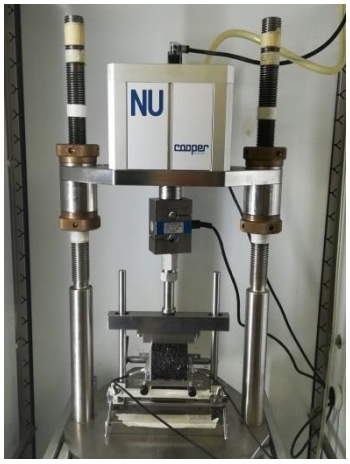


Figura 2.29: allestimento prova a fatica

Il provino in questa prova, a differenza della prova per la valutazione dell'ITSM, deve essere dotato di due lamierini incollati in punti opposti lungo un diametro in quali servono per l'installazione dei trasduttori necessari alla misurazione delle deformazioni. Una volta applicati questi lamierini il provino viene poggiato sul castelletto presente all'interno del macchinario e tenuto fermo dalla barra di carico su cui andrà ad agire il pistone. I trasduttori devono risultare in posizione ortogonale rispetto al pistone. Dopo aver allestito la prova e montato i trasduttori si procedere con l'apertura del software.

Le prime schermate prevedono una descrizione della procedura da svolgere per avviare la prova come ad esempio il posizionamento del provino (figura 2.30 e 2.31), mentre la successiva schermata richiede l'immissione di dati quali:

- Target stress temperature
- Specimen diameter
- Specimen thickness
- Horizontal stress

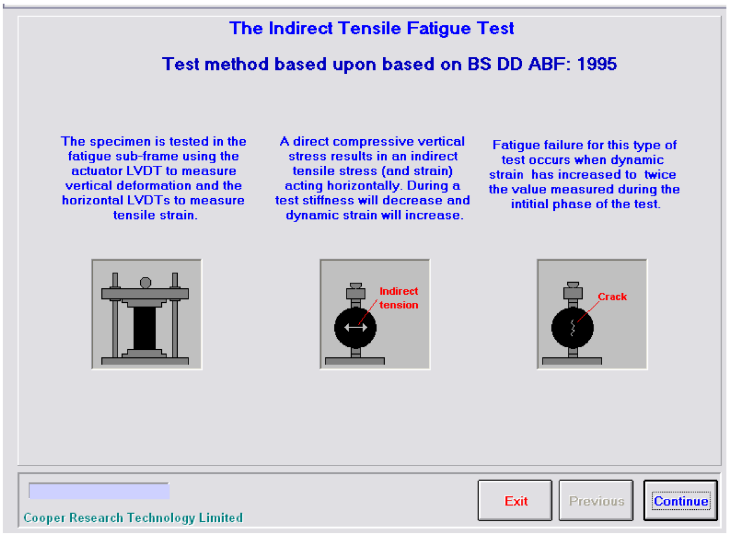


Figura 2.30: schermata iniziale software ITF

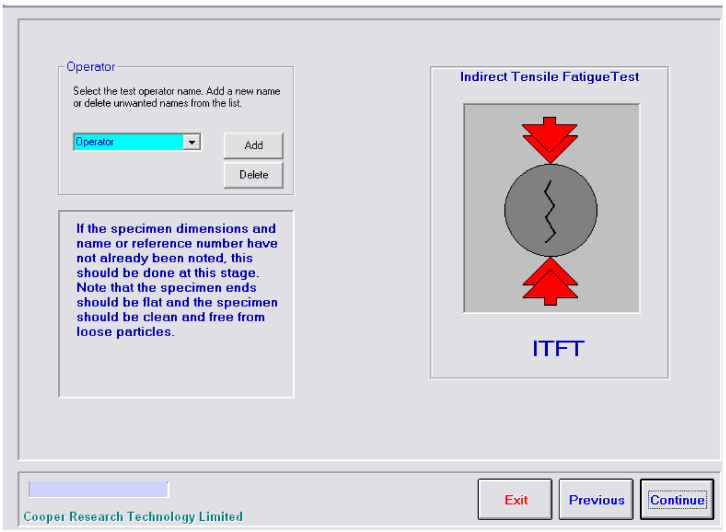


Figura 2.31: seconda schermata software ITF

Dopo aver inserito i dati necessari richiesti, il software richiede il corretto posizionamento dei traduttori: anche in questa prova, come per la prova di modulo anche se con un allestimento differente, i trasduttori vengono regolati attraverso le due viti di cui è dotato un lamierino. Il posizionamento corretto, basto su una precedente taratura dei trasduttori, è indicato attraverso lo stazionamento delle due lancette comparse nel monitor nel tratto compreso tra le due zone rosse (figura 2.32).

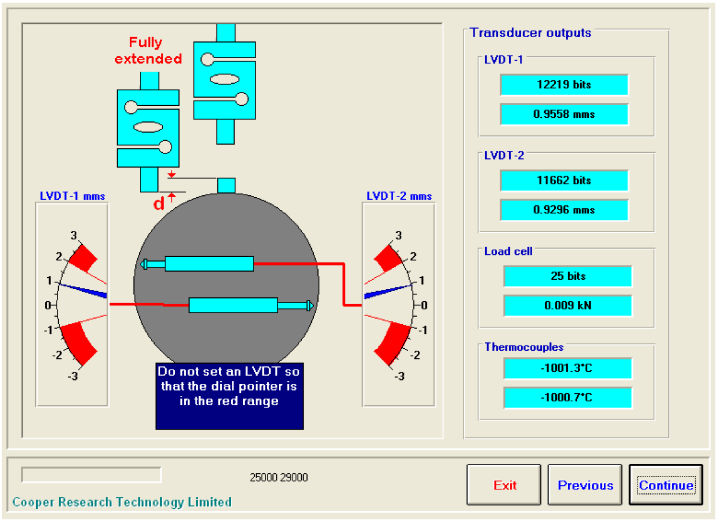


Figura 2.32: posizionamento corretto dei trasduttori

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

La prova si arresterà in due casi e automaticamente:

- Raggiungimento del punto di rottura del provino
- Raggiungimento e superamento della massima deformazione prevista; all'apertura del programma, infatti, è possibile andare a definire una deformazione massima al raggiungimento della quale la prova si deve arrestare (in questa sperimentazione è stato impostato un valore pari a 10 mm in maniera tale da avere margine per il completamento della prova a rottura del provino).

2.4. Specifiche tecniche di capitolato

Come specificato all'inizio del capitolo 2, le varie sperimentazioni affrontate dal laboratorio sono svolte in collaborazione con imprese di costruzioni ed enti preposti al fine di affrontare problemi reali. Proprio per questo, per la caratterizzazione dei conglomerati bituminosi in fase sperimentale occorre far riferimento alle Specifiche Tecniche contenute nei Capitolati dei vari enti. Tali specifiche tecniche hanno un carattere prescrittivo e sono sviluppate con lo scopo di andar a determinare gli specifici requisiti di qualificazione ed accettazione in termini prestazionali sia dei singoli materiali, quali aggregati e leganti, sia della miscela finale, ovvero il conglomerato che ne deriva. Ponendo

questi limiti ogni ente riesce a tener sotto controllo la qualità del lavoro finale e può raggiungere un livello di qualità standardizzato, definito a monte nel capitolato, in ogni opera di sua competenza.

In questa sperimentazione il capitolato a cui si è fatto riferimento è il Capitolato Strade ANAS. Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche a cui si è fatto riferimento nel programma sperimentale, ovvero relative alle caratteristiche che devono avere i materiali impiegati e il conglomerato finale relativi allo strato di Binder. L'obbiettivo principale che si propone la sperimentazione è quello di rientrare nei parametri massimi previsti dal capitolato ma con la differenza che i limiti del capitolato in questione sono previsti per un conglomerato contenente al massimo 15% di Rap mentre nella sperimentazione viene utilizzata una percentuale di RAP pari al 50%.

Per quanto riguarda la componente lapidea le prescrizioni nel capitolato vengono fornite sia per gli aggregati di partenza che per la miscela che andranno a comporre. Per quanto riguarda il materiale inerte in generale il capitolato prevede determinate proprietà fisiche, chimiche e geometriche mentre per quanto riguarda la miscela di aggregati, essa dovrà essere caratterizzata da una distribuzione granulometrica tale per cui essa rientri all'interno del fuso granulometrico previsto al capitolato d'appalto.

In riferimento agli inerti viene specificato quanto segue:

Gli inerti dovranno essere costituiti da elementi sani, duri, di forma poliedrica, puliti esenti da polvere e da materiali estranei secondo le norme UNI EN 13043; gli elementi litoidi non dovranno mai avere forma appiattita, allungata o lenticolare. La miscela degli inerti è costituita dall'insieme degli aggregati grossi e dagli aggregati fini ed eventuali additivi (filler) secondo la definizione delle norme UNI EN 13108-1. Ai fini dell'impiego è obbligatoria l'attestazione di conformità (CE) da parte del produttore relativamente (almeno) ai requisiti richiesti. *[pag. 45-46, cpt. 7.1.3 Capitolato Strade ANAS]*

Inoltre vengono definiti particolari restrizioni per quanto riguarda l'aggregato grosso, ovvero pezzature da 4 mm a 31.5 mm, e aggregato fine, ovvero aggregato di dimensioni minori di 4 mm:

L'aggregato grosso sarà costituito da frantumati, ghiaie, ghiaie frantumate, pietrischetti e graniglie che potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa, purché alle prove di seguito elencate eseguite su campioni rispondenti alla miscela che si intende formare risponda ai seguenti requisiti:

strato di Binder :

Per questo strato dovranno essere impiegati esclusivamente inerti frantumati (privi di facce tonde), con una perdita in peso alla prova Los Angeles eseguita sulle singole pezzature (secondo la Norma UNI EN 1097-2) inferiore o uguale al 25%. Il coefficiente di appiattimento, determinato in accordo con la UNI EN 933-3, deve essere inferiore o uguale a 15. *[pag. 46, cpt. 7.1.4 Capitolato Strade ANAS]*

L'aggregato fino di tutte le miscele sarà costituito esclusivamente da sabbie di frantumazione. L'equivalente in sabbia determinato secondo la UNI EN 933-8 dovrà essere superiore od uguale a 75, nel caso di impiego in strati di usura, ovvero superiore o uguale a 60 negli altri casi . *[pag. 47, cpt. 7.1.5 Capitolato Strade ANAS]*

Per quanto riguarda le miscele esse vengono così caratterizzate:

Le miscele dovranno avere una composizione granulometrica determinata in conformità con la UNI EN 13108-1 e UNI EN 12697-2 utilizzando i setacci appartenenti al gruppo base+2 e compresa nei fusi di seguito elencati e una percentuale di bitume riferita al peso della miscela, compresa tra i sottoindicati intervalli per i diversi tipi di conglomerato. *[pag. 47, cpt. 7.1.7 Capitolato Strade ANAS]*

e facendo riferimento allo strato di binder con bitume modificato e tal quale, la distribuzione granulometrica con conseguente fuso granulometrico di riferimento sono quelle riportate nella tabella e figura seguenti:

Serie setacci UNI EN	Passante [%]	
20	100	100
16	90	100
12.5	66	86
8	52	72
4	34	54
2	25	40
0.5	10	22
0.25	6	16
0.063	4	8

Tabella 2.8: distribuzione granulometrica

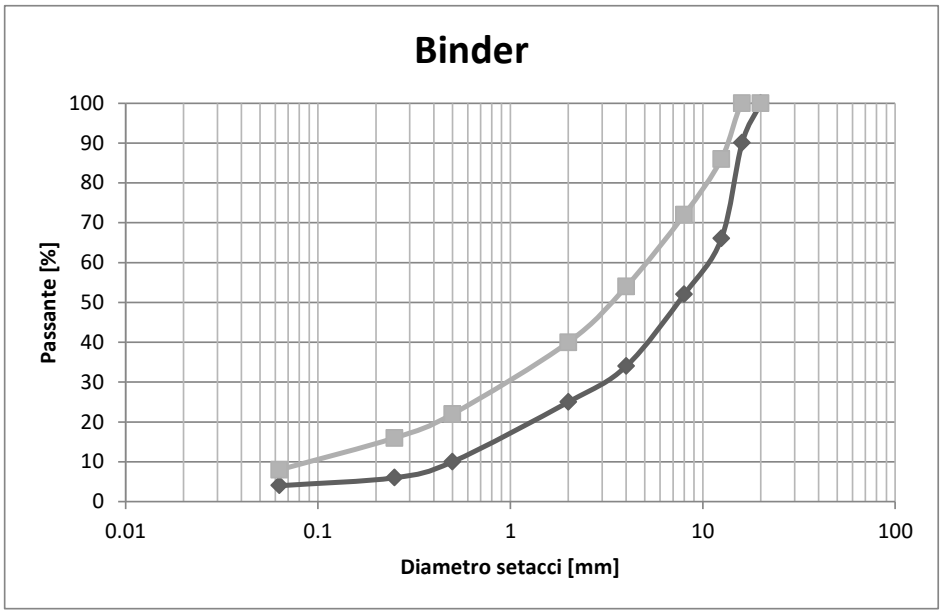


Figura 2.33: fuso granulometrico

In relazione al progetto della miscela, esso è mirato alla definizione della percentuale ottimale dei vuoti. Il progetto del conglomerato va effettuato sul metodo volumetrico che impiega la pressa giratoria.

Il capitolato riporta i requisiti in termini di contenuto dei vuoti a varie fasi di compattazione e inoltre va a determinare i parametri di prova relativi alla pressa giratoria (i parametri sono gli stessi che sono stati utilizzati nella sperimentazione e che sono stati inseriti nel capitolo precedente in cui sono state descritte le varie fasi della procedura di realizzazione del conglomerato bituminoso e dei provini).

Tutti i risultati della sperimentazione in esame faranno riferimento ad una percentuale di vuoti compresi tra il 3% e il 6%, come prevede il capitolato per provini realizzati con la pressa giratoria ad un numero di giri pari a 100.

Dopo aver determinato che tali requisiti siano rispettati, il capitolato prevede limiti anche nei risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione meccanica.

I parametri di riferimento in questo caso sono due ed entrambi relativi alla prova di trazione indiretta. I due valori in gioco sono Rt, resistenza a trazione indiretta, e CTI, coefficiente di trazione indiretta:

$$Rt\ [GPa \times 10\text{-}3] = 0.72 – 1.50$$

$$CTI\ [GPa \times 10\text{-}3] \geq 65$$

Sempre in riferimento alle prove da effettuare sui provini è raccomandato di effettuarne per la determinazione del modulo di rigidezza; per queste prove non è definita una specifica limitazione ma è consigliata per ottenere utili indicazioni sul materiale in questione.

3. Analisi dei risultati

La sperimentazione ha avuto inizio con la determinazione delle curve granulometriche degli aggregati vergini e del RAP.

Dopo aver definito il quantitativo ottimale di bitume si è passati alla fase realizzativa delle miscele. Sono state realizzate le tre miscele, la prima con 0% di RAP, la seconda e la terza con il 50% di RAP e quest'ultima con aggiunta dell'additivo scelto. Queste tre miscele poi sono state analizzate attraverso le metodologie e gli strumenti sopradescritti ed infine, i risultati ottenuti sono stati confrontati.

Nei paragrafi successivi si riportano i risultati sperimentali, ottenuti durante tutta la sperimentazione, delle singole miscele di conglomerato ed il loro confronto così da rendere più immediata la comprensione.

3.1. Determinazione curve granulometriche aggregati

In questa sperimentazione la curva granulometrica di progetto, utilizzata per la realizzazione delle miscele dei provini, è stata sviluppata facendo riferimento al fuso granulometrico per aggregati definito nel Capitolato Strade ANAS per lo strato di Binder riportato nel capitolo precedente in cui sono stati definite le specifiche di capitolato.

Il fuso granulometrico definito nel Capitolato Strade ANAS è costituito da due curve granulometriche ideali, la prima che individua per ogni setaccio il passante minimo e la seconda che individua il passante massimo, che fissano i limiti entro i quali deve ricadere la curva granulometrica di progetto. La curva granulometrica di progetto in questione (riportata insieme al fuso granulometrico di riferimento nella tabella 3.1) è stata ottenuta variando manualmente le percentuali delle singole frazioni granulometriche, senza però contare il filler.

In considerazione del fatto che è stata utilizzata una sola tipologia di aggregato, ovvero aggregato calcareo la curva granulometrica da definire è stata solo una.

Per quanto riguarda la percentuale di bitume vergine da aggiungere all'impasto, è stata definita come percentuale ottimale il 5,5% sull'aggregato che corrisponde al limite superiore imposto dal capitolato ed associato alla curva granulometrica costruita sul passante massimo.

	Fuso granulometrico ANAS		Curva di progetto
Apertura [mm]	Pmin [%]	Pmax [%]	P[%]
31.5	100	100	100
20	100	100	99.1
16	90	100	98
12.5	66	86	76.3
8	52	72	61.9
4	34	54	45.2
2	25	40	30
0.5	10	22	15.4
0.25	6	16	11.8
0.063	4	8	7.1

Figura 3.1: fuso granulometrico ANAS e curva di progetto

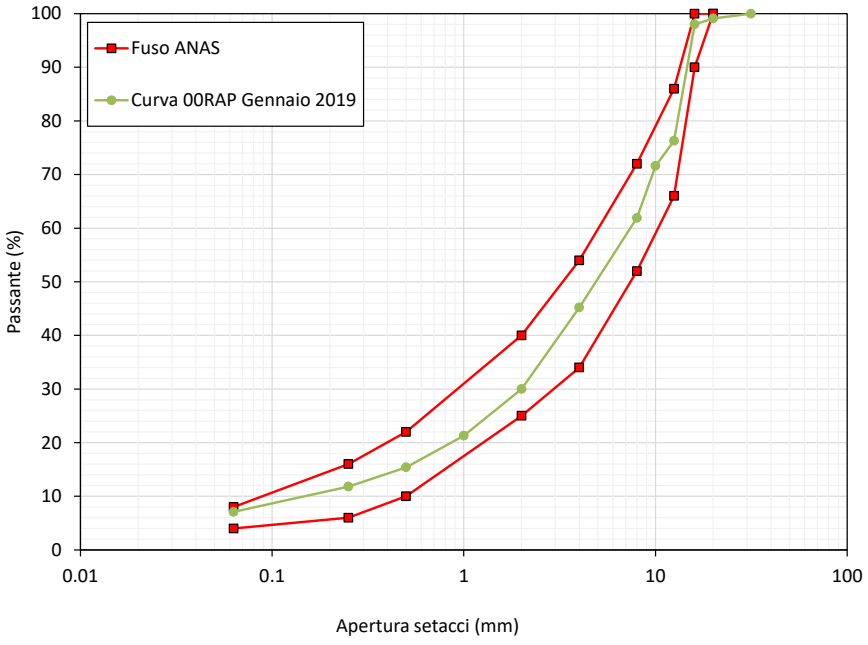


Figura 3.1: curva granulometrica adottata nel mix design delle 3 miscele

La differenza che intercorre tra la prima miscela e le altre due è l'impiego in quest'ultime del RAP. Nella tabella 3.2 viene riportata la distribuzione granulometrica delle due pezzature di RAP impiegato, ovvero RAP grosso e RAP fino.

Apertura [mm]	RAP Grosso	RAP fino	RAP
31.5	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	100
12.5	98.5	100	78.7
8	75.2	95.1	61.3
4	48.6	66.7	43.0
2	32.2	43.6	29.5
0.5	22.06	29.6	19.2
0.25	15.0	20.7	14.3
0.063	4.2	6.7	6.6

Figura 3.2: distribuzione granulometrica RAP

3.2. Mix 1 – 00 RAP

Il primo impasto è stato realizzato attraverso il solo impiego di aggregati e bitume vergini, quindi caratterizzato da 0% di RAP.

Di seguito viene riportati gli elementi impiegati nella miscela (tabella 3.3) e le percentuali in peso e volume degli aggregati utilizzati (tabella 3.4)

tipo di legante	bitume vergine
tipo di aggregati	calcarei
RAP	0%
Additivo	no
quantità di legante	
% bit dal RAP	0%
% bit vergine (sull'agg.)	5.5%
% bit totale (sul mix)	5.2%
% bit totale (sull'agg.)	5.5%
% bit vergine (sul mix)	5.5%

Tabella 3.3: elementi impiegati nella miscela

	Filler	Sabbia	Calcare 8/16	Calcare 12/16	RAP Grosso	RAP Fino
% volume	3.5	48	23.5	25	0	0
% peso	3.5	48	23.5	25	0	0

Tabella 3.4: percentuali in peso e volume degli aggregati impiegati

Andando a calcolare ed analizzare la percentuale dei vuoti dei singoli provini, si è riscontrato che tendenzialmente si è ottenuto in questo primo impasto un tenore di vuoti leggermente superiore al valore massimo definito da capitolato.

Di seguito è riportata la tabella di calcolo dei vuoti di tutti e 18 i provini della miscela realizzati attraverso la pressa a taglio giratorio a 100 giri.

No. Provino	No. Giri	m [g]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h4 [mm]	hm [mm]
1	100	1080.4	60.2	59.8	60.1	59.70	59.95
2	100	1099.7	59.9	60.2	60.2	61.30	60.40
3	100	1089.9	60.2	59.8	60.1	60.00	60.03
4	100	1086.5	59.7	60.2	60.3	59.40	59.90
5	100	1095	59.7	59.4	59.5	59.40	59.50
6	100	1098.9	61	60.2	60.3	60.50	60.50
7	100	1096	59.9	60.3	60.5	59.80	60.13
8	100	1109.6	60.4	60.8	60.9	61.00	60.78
9	100	1103.7	60	60.1	60.5	60.10	60.18
10	100	1089.5	60.1	59.8	59.2	59.40	59.63
11	100	1075.1	59.1	60.1	59.9	60.00	59.78
12	100	1094.7	59.7	60.2	60.5	60.10	60.13
13	100	1099.2	60.1	60.8	59.9	60.10	60.23
14	100	1090.5	60.9	60.1	60.6	60.70	60.58
15	100	1096.2	60.1	61	60	59.90	60.25
16	100	1097.2	59.9	61	59.9	60.00	60.20
17	100	1092.7	60	59.9	59.9	59.10	59.73
18	100	1094.6	60.9	60	59.7	59.80	60.10

No. Provino	ρb,geom [g/cm3]	Pb [%]	Pa [%]	ρB [g/cm3]	ρA [g/cm3]	ρm [g/cm3]	Vm,geom [%]
1	2.29	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	7.14
2	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.18
3	2.31	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.44
4	2.31	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.53
5	2.34	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	5.17
6	2.31	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.40
7	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.07
8	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	5.92
9	2.34	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	5.49
10	2.33	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	5.84
11	2.29	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	7.32
12	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.18
13	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	5.95
14	2.29	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	7.23
15	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.25
16	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.08
17	2.33	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	5.72
18	2.32	5.2	94.8	1.02	2.68	2.47	6.15

Tabella 3.5 : calcolo del volume dei vuoti mix 1 - 00 RAP

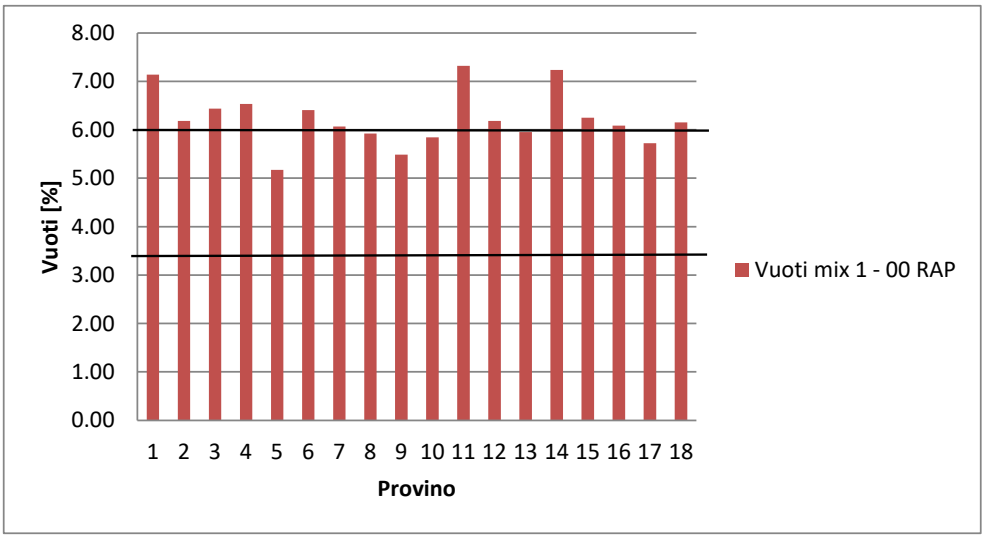


Figura 3.2: istogramma confronto vuoti

Di seguito vengono riportati i risultati elaborati a partire dai dati estratti dalle prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta e prova a rottura a trazione indiretta. Queste due prove sono state svolte sui primi 4 provini della miscela.

MIX 1 - 00 RAP		
Provino	**Diagonale**	**ITSM [Mpa]**
1	1	5739
	2	5584
2	1	7431
	2	7163
3	1	6817
	2	6670
4	1	6375
	2	6228
Media		6500.9

Tabella 3.6: Risultati prova modulo trazione indiretta mix 1 - 00 RAP

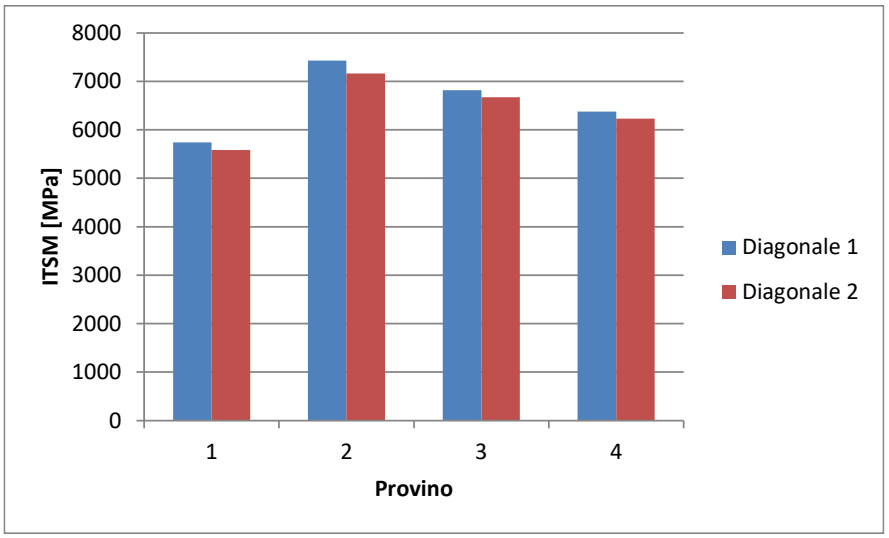


Figura 3.3: Istogramma risultati prova modulo trazione indiretta mix 1 - 00 RAP

MIX 1 - 00 RAP			
Provino	**ε_{rot} [mm/mm]**	**ITS [Mpa]**	**CTI [Mpa]**
1	0.0292	1.087	58.44
2	0.0327	1.132	54.35
3	0.0297	1.118	59.10
4	0.0288	1.056	57.57
Media	0.0301	1.10	57.37

Tabella 3.7: Risultati prova rottura trazione indiretta

In questo caso i valori di ITS sono ampiamente al di sotto del limite massimo previsto dal capitolato di riferimento. Per quanto riguarda i valori di CTI, invece, risultano leggermente inferiori al limite minimo imposto dal capitolato.

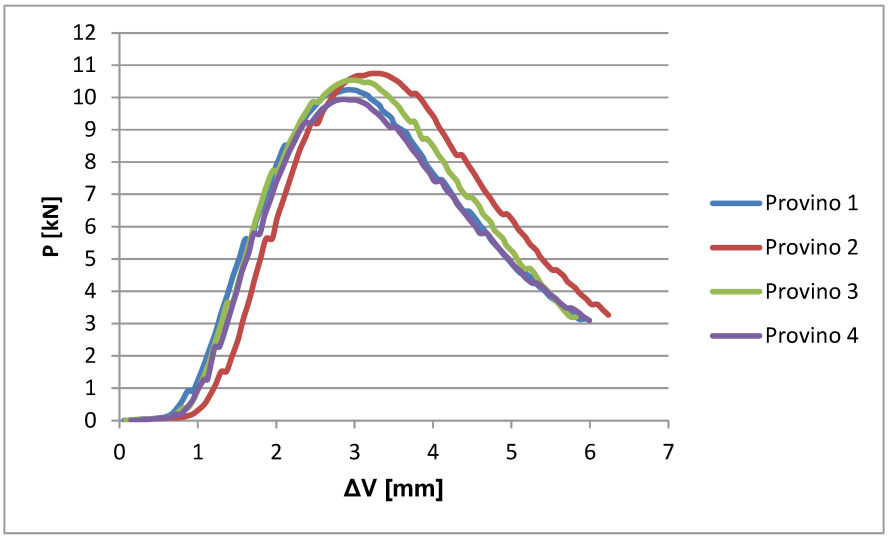
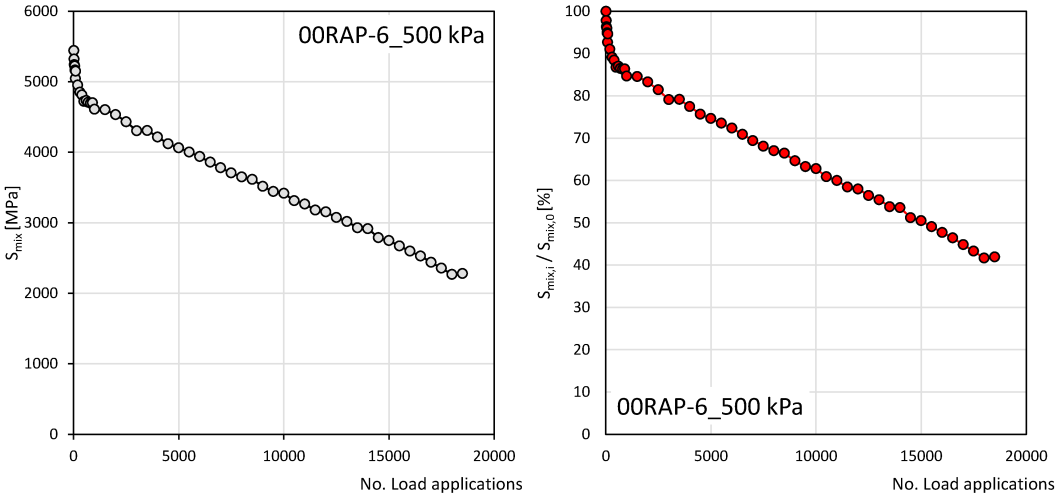


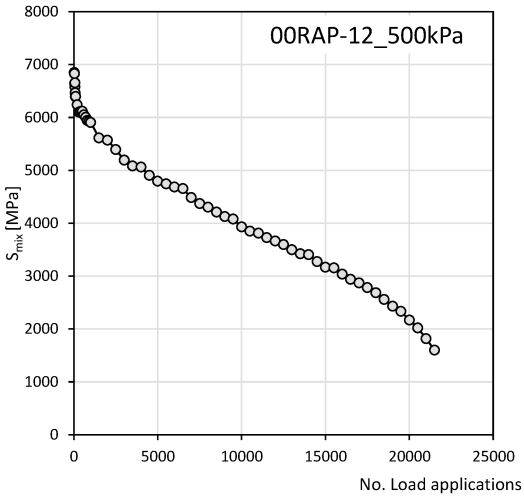
Figura 3.4: grafico carico-corsa prova trazione indiretta mix 1 - 00 RAP

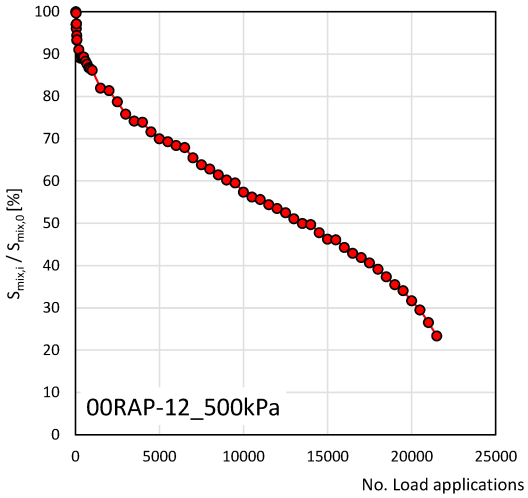
Successivamente alle due prove precedenti, si è effettuata la prova a fatica sui restanti provini. La prova si è svolta andando a definire tre livelli di carico per ognuno dei quali si è sottoposto a tale prova almeno 3 provini. Di seguito vengono riportati i risultati della prova a fatica di tutti i provini della prima miscela sotto forma di grafici.

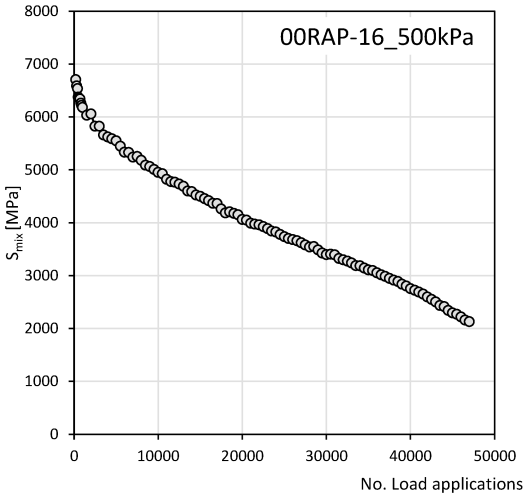
NOTA: nei seguenti grafici è riportato nome miscela – numero provino – carico applicato

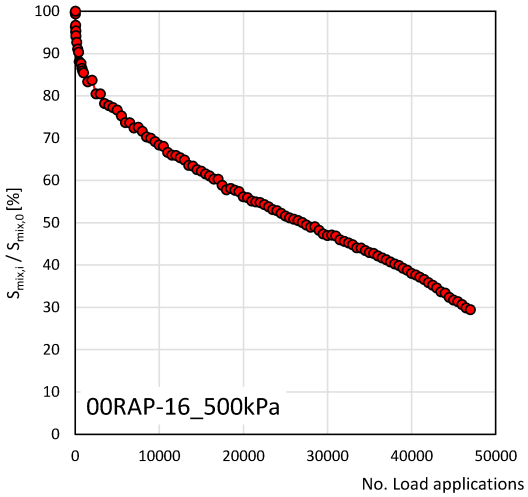
Carico 500 kPa:



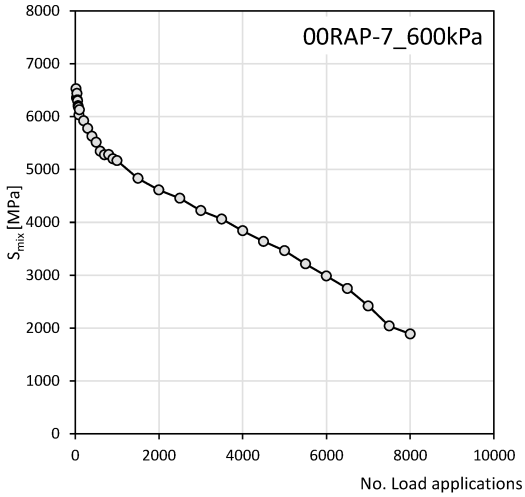


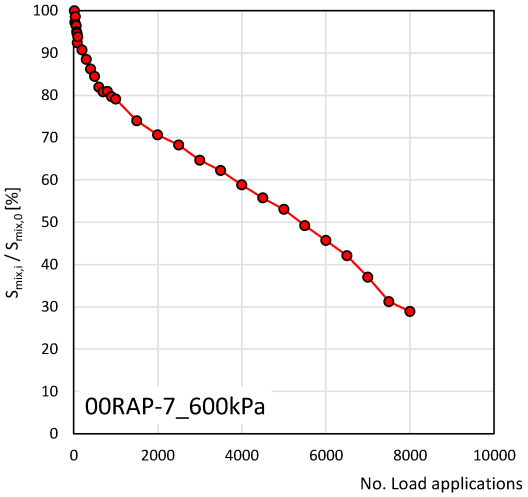


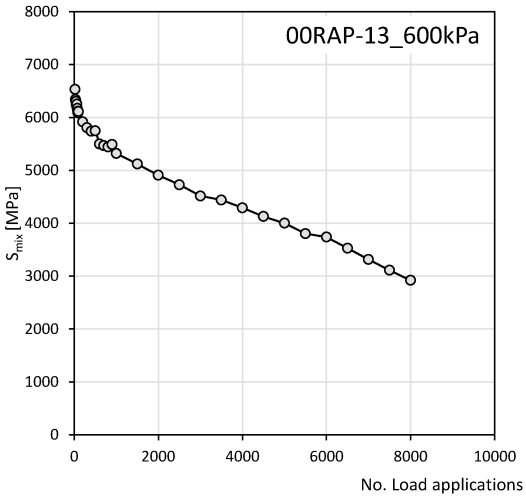


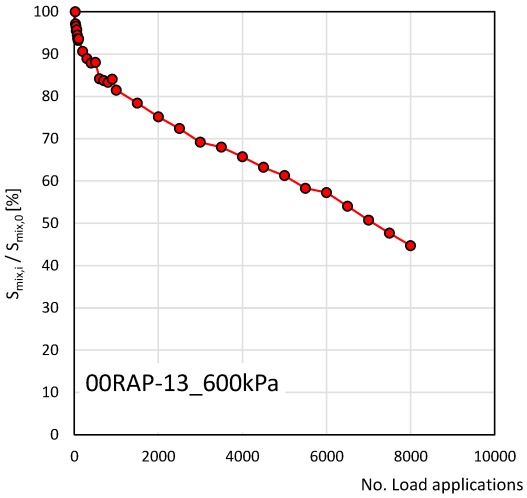


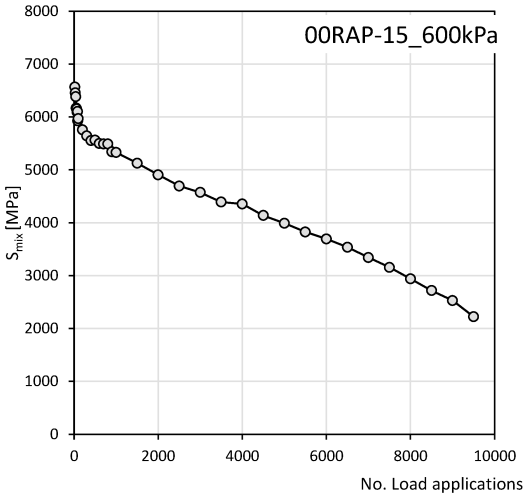
Carico 600 kPa:

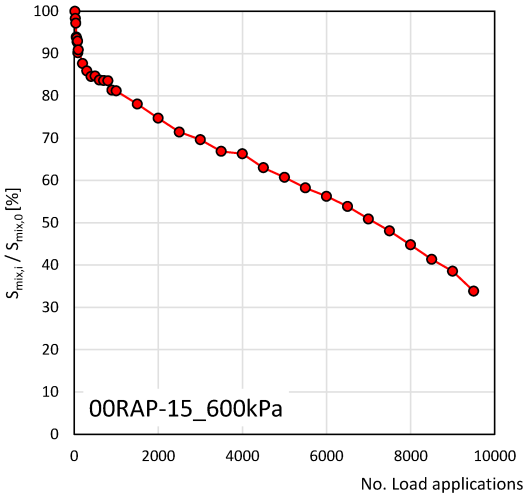




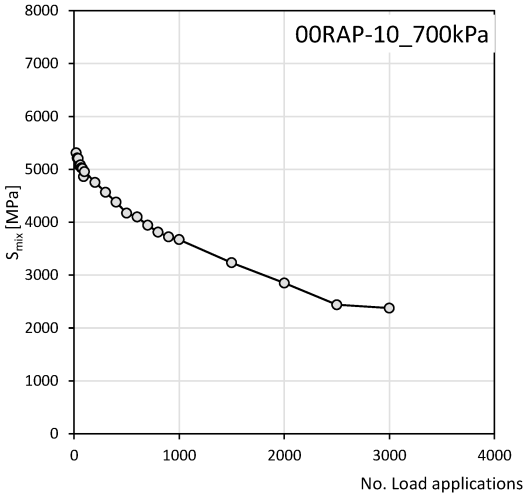


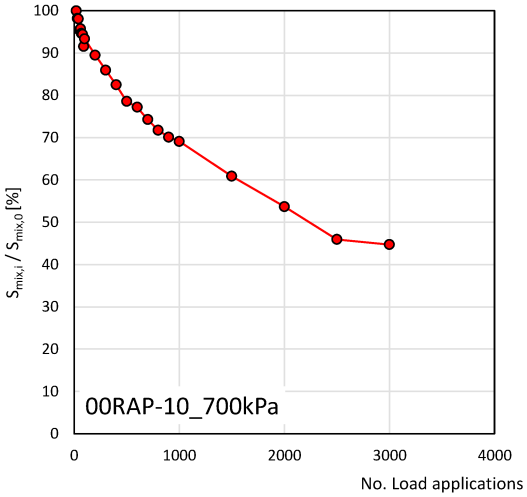


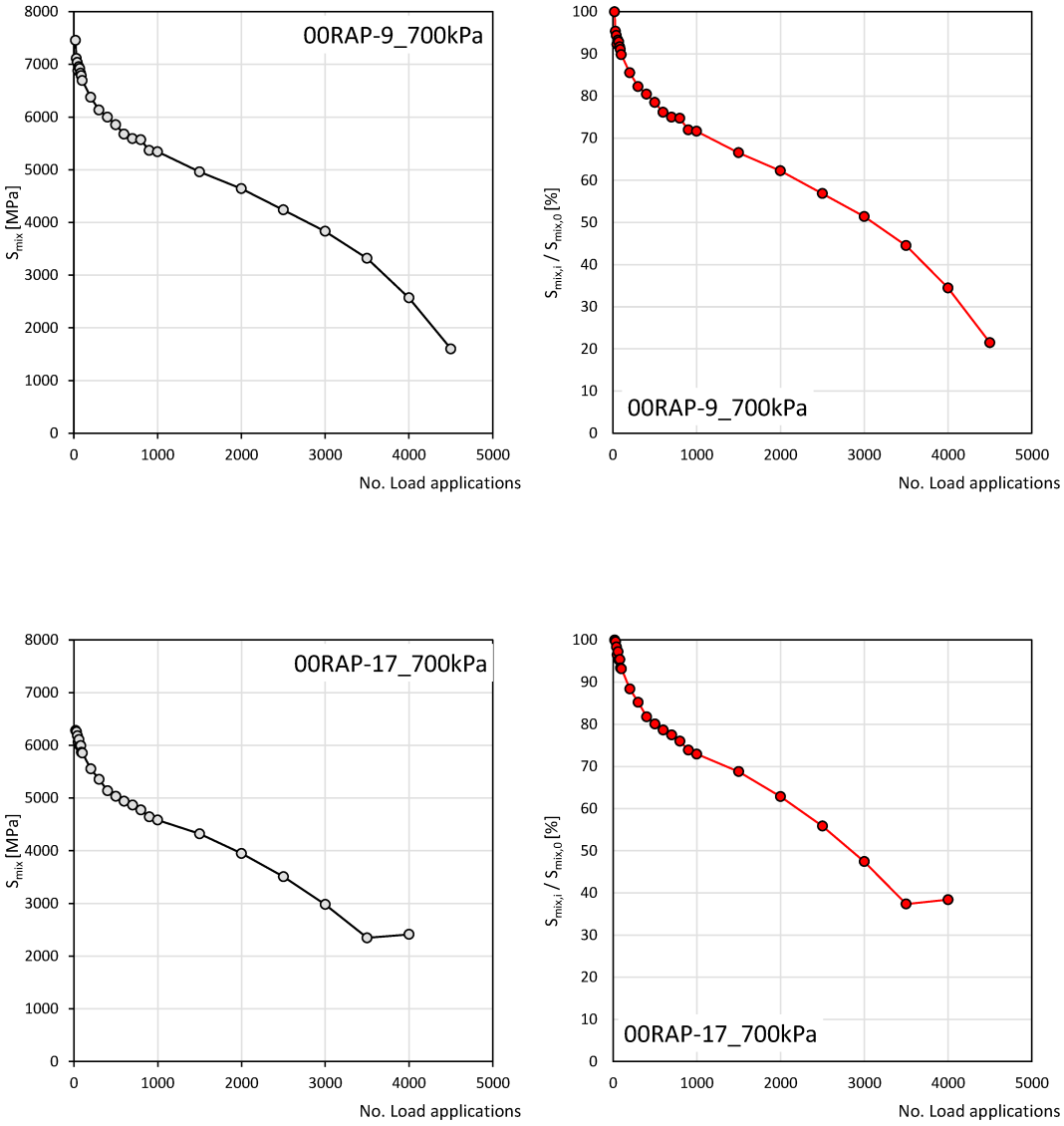




Carico 700 kPa:







La prima prova svolta, con un carico di 400 kPa è stata effettuata su un solo provino in quanto dallo sviluppo della prova si è capito che il carico applicato era esiguo e avrebbe comportato un rallentamento complessivo del programma sperimentale senza apportare un contributo positivo ai risultati finali.

Fracture Life				
Specimen	Target stress [kPa]	Initial Stiffness [MPa]	Initial dynamic strain [µm/m]	Initial permanent horizontal strain [µm/m]
00RAP-06	500	5443	188	145
00RAP-12	500	6853	150	85
00RAP-16	500	7239	142	66
00RAP-07	600	6529	188	128
00RAP-13	600	6533	188	112
00RAP-15	600	6569	187	114
00RAP-09	700	7456	192	91
00RAP-10	700	5311	270	186
00RAP-17	700	6283	228	145

Permanent horizontal deformation at $N_{f,tot}$ [mm]	Permanent vertical deformation at $N_{f,tot}$ [mm]	$S_{mix,50}$ [MPa]	$N_{f,tot}$	$N_{f/50}$
1.095	3.745	2748	22436	15000
1.447	5.152	3422	22526	13500
1.293	5.033	3622	55076	27000
1.198	3.328	3213	8636	5500
0.743	3.683	3314	10286	7000
1.223	3.735	3343	10686	7000
0.733	2.596	3832	4906	3000
1.153	3.648	2645	3566	2000
0.716	1.740	3244	4000	2750

Tabella 3.8: Risultati prova a fatica mix 1 - 00 RAP

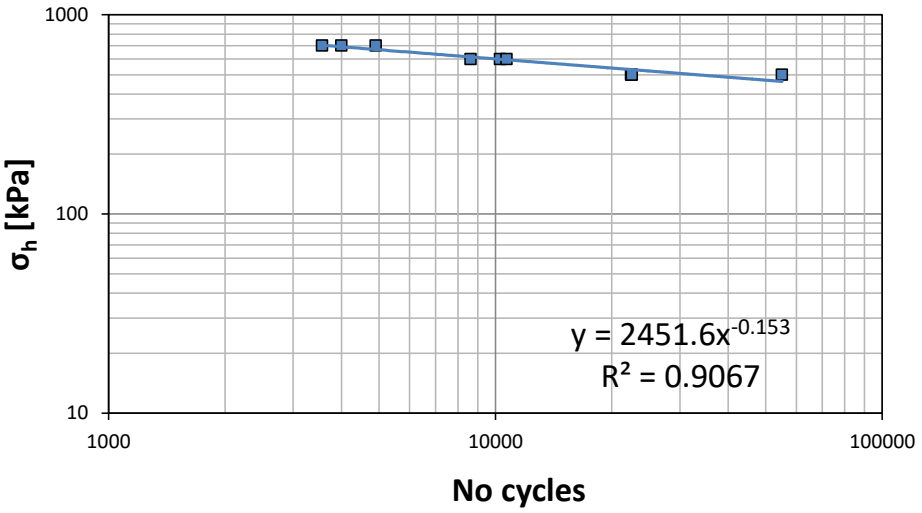


Figura 3.5: Interpolazione dati prova a fatica

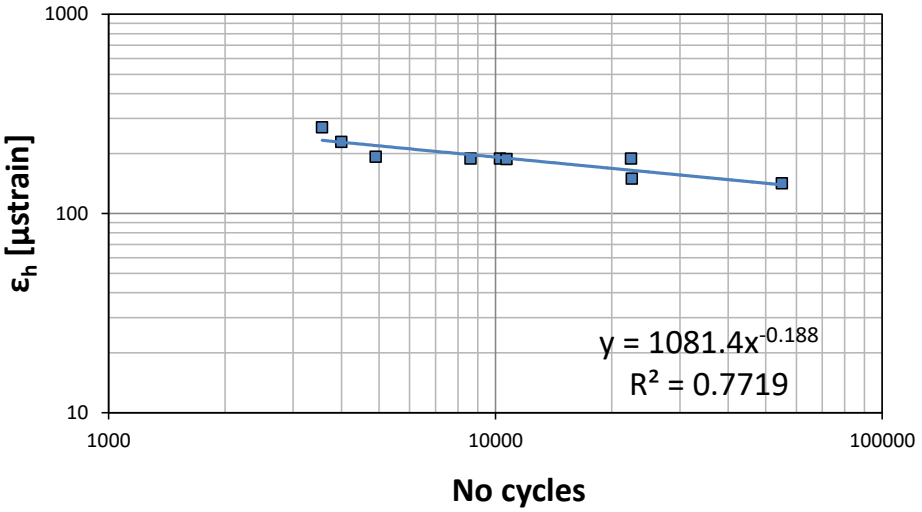


Figura 3.6: Interpolazione dati prova a fatica

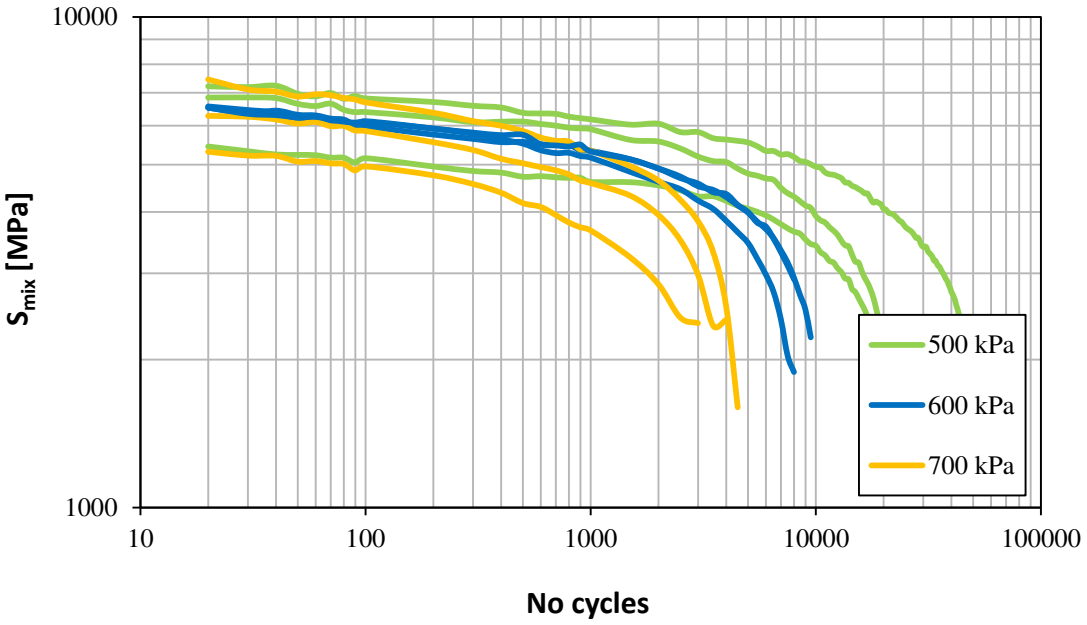


Figura 3.7: confronto andamento prove singoli provini (piano semilogaritmico)

3.3. Mix 2 – 50 RAP

Il secondo impasto è stato realizzato aggiungendo alla miscela di aggregati vergini, il RAP ma senza aggiunta di nessun tipo di additivo volto al miglioramento delle caratteristiche della miscela caratterizzata da RAP.

Di seguito viene riportati gli elementi impiegati nella miscela (tabella 3.9) e le percentuali in peso e volume degli aggregati utilizzati (tabella 3.10)

tipo di legante	bitume vergine
tipo di aggregati	calcarei
RAP	50%
Additivo	no
quantità di legante	
% bit dal RAP	3%
% bit vergine (sull'agg.)	3.0%
% bit totale (sul mix)	5.3%
% bit totale (sull'agg.)	5.6%
% bit vergine (sul mix)	3.1%

Tabella 3.9: elementi impiegati nella miscela

	Filler	Sabbia	Calcare 8/16	Calcare 12/16	RAP Grosso	RAP Fino
% volume	3.8	9.6	12.5	22.1	19.2	28.8
% peso	4.0	10.0	13.0	23.0	20.0	30.0

Tabella 3.10: percentuali in peso e volume degli aggregati impiegati

Andando a calcolare ed analizzare la percentuale dei vuoti dei singoli provini, si è riscontrato che tendenzialmente in questo secondo impasto il tenore dei vuoti rientra perfettamente nel range di valori definito da capitolato, al più di qualche provino che è risultato caratterizzato da valori leggermente superiori.

Nella pagina seguente è riportata la tabella di calcolo dei vuoti di tutti e 18 i provini della miscela realizzati attraverso la pressa a taglio giratorio a 100 giri.

No. Provino	No. Giri	m [g]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h4 [mm]	hm [mm]
1	100	1098	58.3	58.8	58.6	58.9	58.65
2	100	1122.2	60	59.5	59.7	60.1	59.83
3	100	1117.9	60	60	59.5	59.7	59.80
4	100	1115.6	59.9	59.8	60.3	59.8	59.95
5	100	1122.4	60.3	61.1	60.2	60.5	60.53
6	100	1103.4	59.5	59.9	59.9	60.7	60.00
7	100	1080.7	58.3	58	58	58.6	58.23
8	100	1103.2	59.2	59.1	59.4	59.4	59.28
9	100	1092.6	59.3	59.7	59	59.4	59.35
10	100	1105	58.8	58.8	59.1	59	58.93
11	100	1094.8	59.8	60.2	59.5	60	59.88
12	100	1097.2	58.5	58.8	58.5	58.7	58.63
13	100	1090.5	58.3	58.2	58.4	58.5	58.35
14	100	1091.7	60.4	59.2	59.9	59.5	59.75
15	100	1087.3	59.1	58.5	58.2	58.2	58.50
16	100	1088.9	58.6	59	58.5	58.3	58.60
17	100	1090.2	59.1	59.1	59.2	59.2	59.15
18	100	1081	58.8	59	58.8	58	58.65

No. Provino	ρb,geom [g/cm3]	Pb [%]	Pa [%]	ρB [g/cm3]	ρA [g/cm3]	ρm [g/cm3]	Vm,geom [%]
1	2.384	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.5
2	2.388	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.3
3	2.380	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.7
4	2.369	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.1
5	2.361	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.4
6	2.341	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.2
7	2.363	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.4
8	2.370	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.1
9	2.344	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.1
10	2.388	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.4
11	2.328	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.8
12	2.383	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.6
13	2.380	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.7
14	2.326	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.8
15	2.366	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.2
16	2.366	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.2
17	2.347	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.0
18	2.347	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.0

Figura 3.11: calcolo del volume dei vuoti mix 2 - 50 RAP

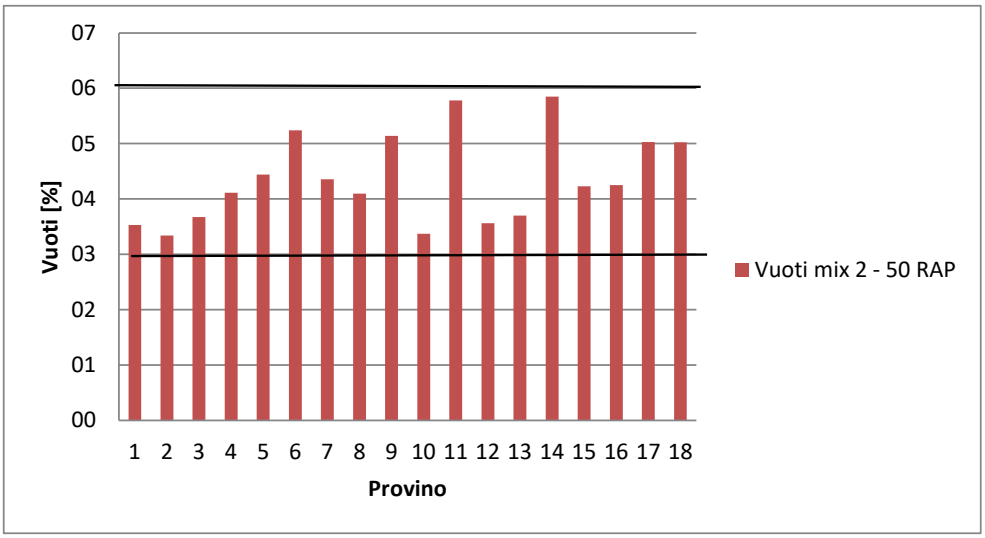


Figura 3.8: istogramma confronto vuoti

Di seguito vengono riportati i risultati elaborati a partire dai dati estratti dalle prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta e prova a rottura a trazione indiretta. Queste due prove sono state svolte sui primi 4 provini della miscela.

MIX 2 - 50 RAP		
Provino	**Diagonale**	**ITSM [Mpa]**
1	1	16360
	2	15774
2	1	14413
	2	15474
3	1	14779
	2	14844
4	1	16303
	2	15183
Media		15391.3

Tabella 3.11: Risultati prova modulo trazione indiretta mix 2 - 50 RAP

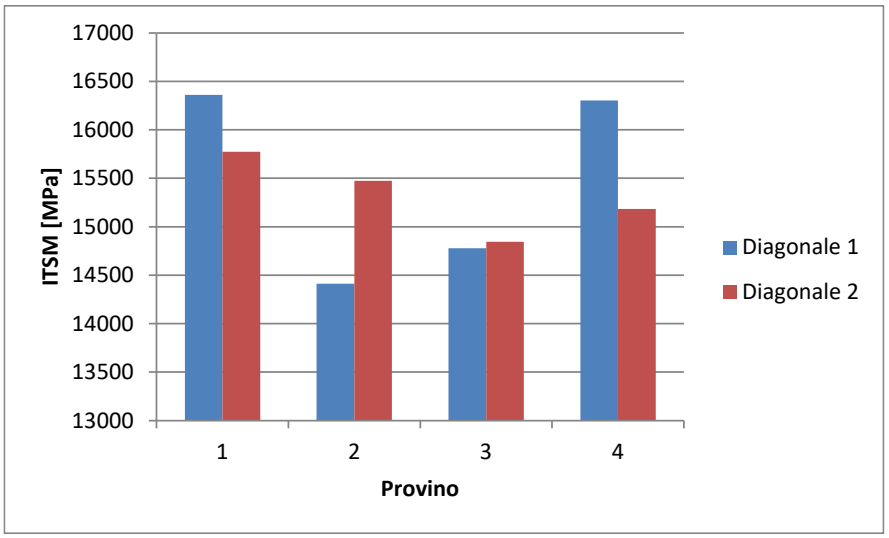


Figura 3.9: istogramma risultati prova modulo trazione indiretta mix 2 - 50 RAP

MIX 2 - 50 RAP			
Provino	**ε_{rot} [mm/mm]**	**ITS [Mpa]**	**CTI [Mpa]**
1	0.029171	1.897	102.10
2	0.031352	1.856	92.94
3	0.02939	2.045	109.24
4	0.03825	2.012	82.58
Media	0.03204	1.953	96.72

Tabella 3.12: risultati prova rottura trazione indiretta

In miscela i valori di ITS sono molto elevati e superano ampiamente il limite previsto dal capitolato di riferimento. Per quanto riguarda i valori di CTI, invece, essendo molto elevati rispettano ampiamente il limite minimo imposto dal capitolato.

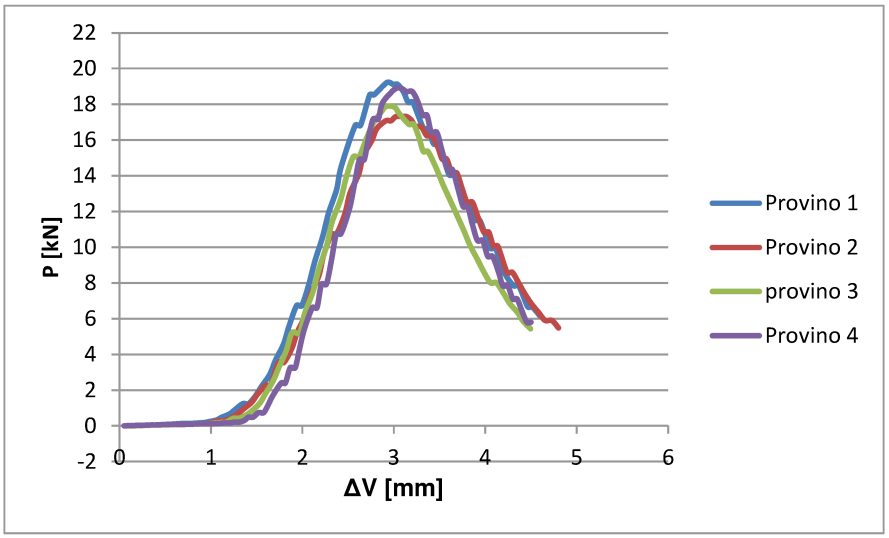
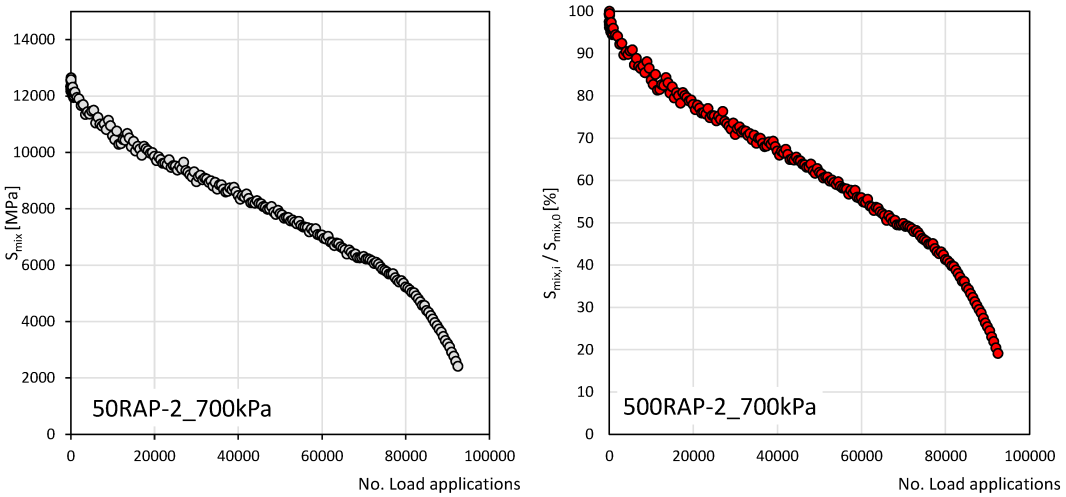


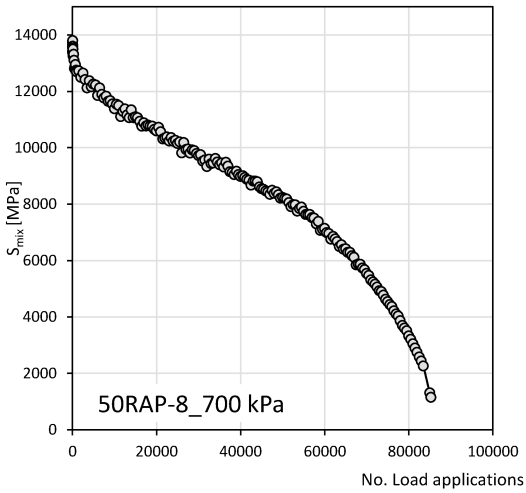
Figura 3.10: grafico carico-corsa prova trazione indiretta mix 2 - 50 RAP

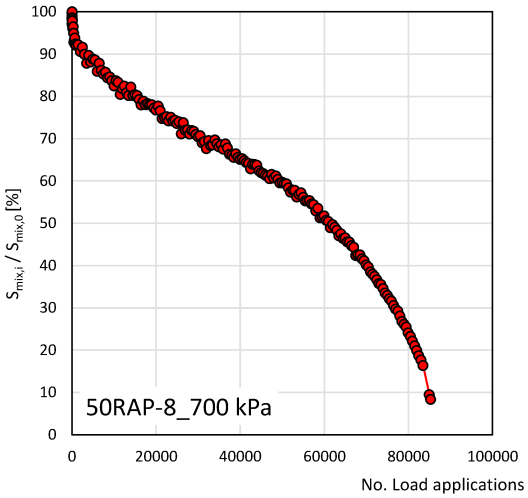
Successivamente alle due prove precedenti, si è effettuata la prova a fatica sui restanti provini. La prova si è svolta andando a definire tre livelli di carico per ognuno dei quali si è sottoposto a tale prova almeno 3 provini. Di seguito vengono riportati i risultati della prova a fatica di tutti i provini della prima miscela sotto forma di grafici.

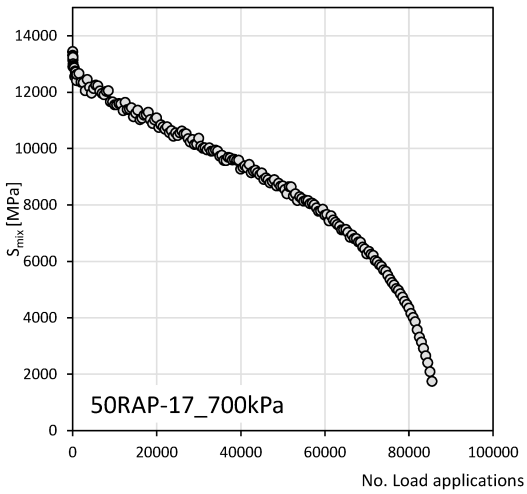
NOTA: nei seguenti grafici è riportato nome miscela – numero provino – carico applicato

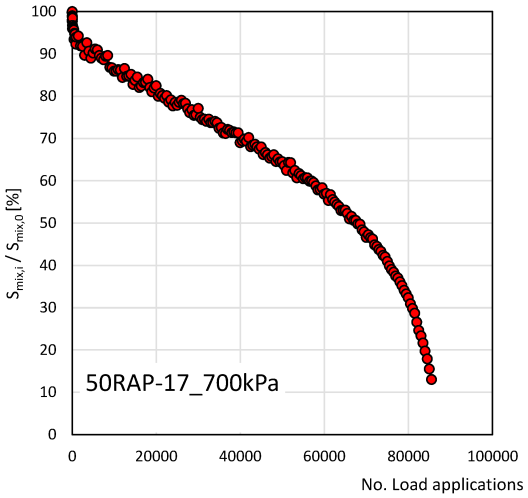
Carico 700 kPa:



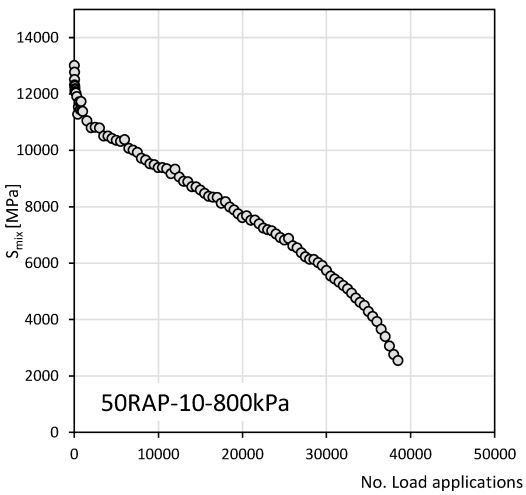


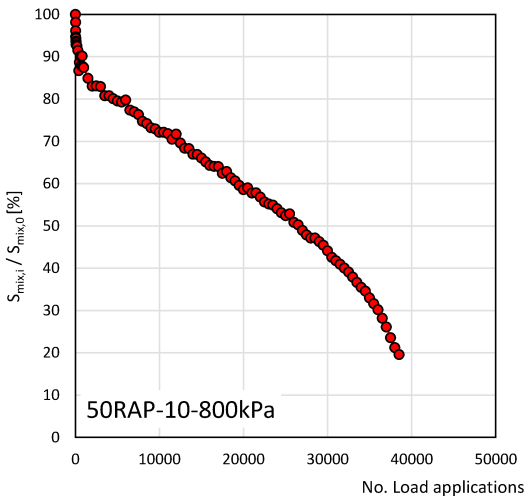


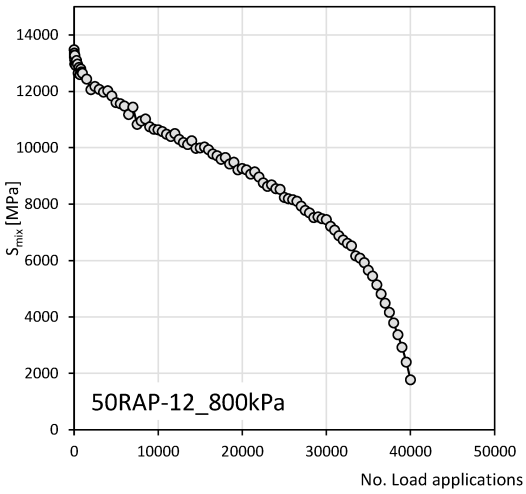


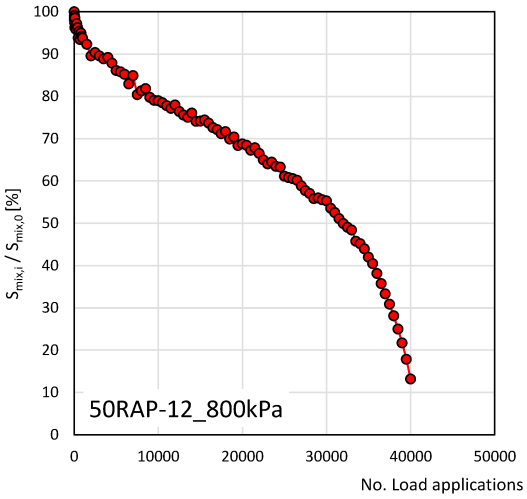


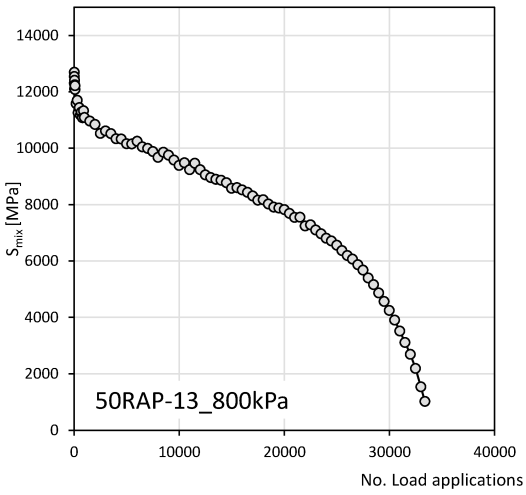
Carico 800 kPa:

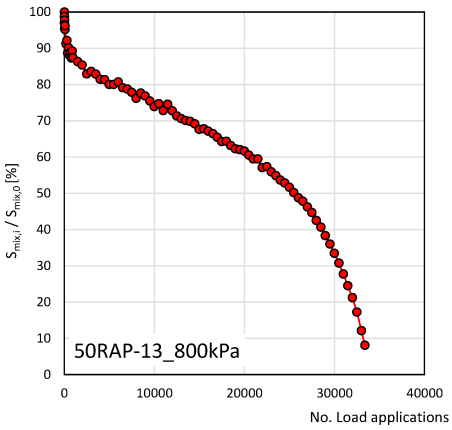




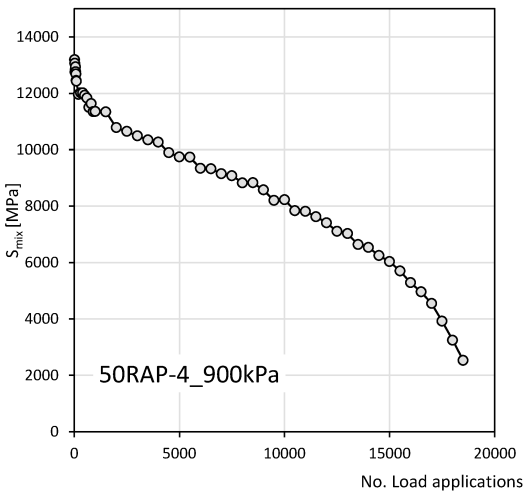


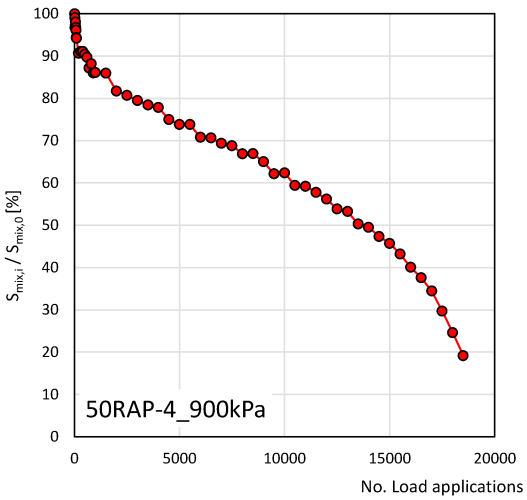


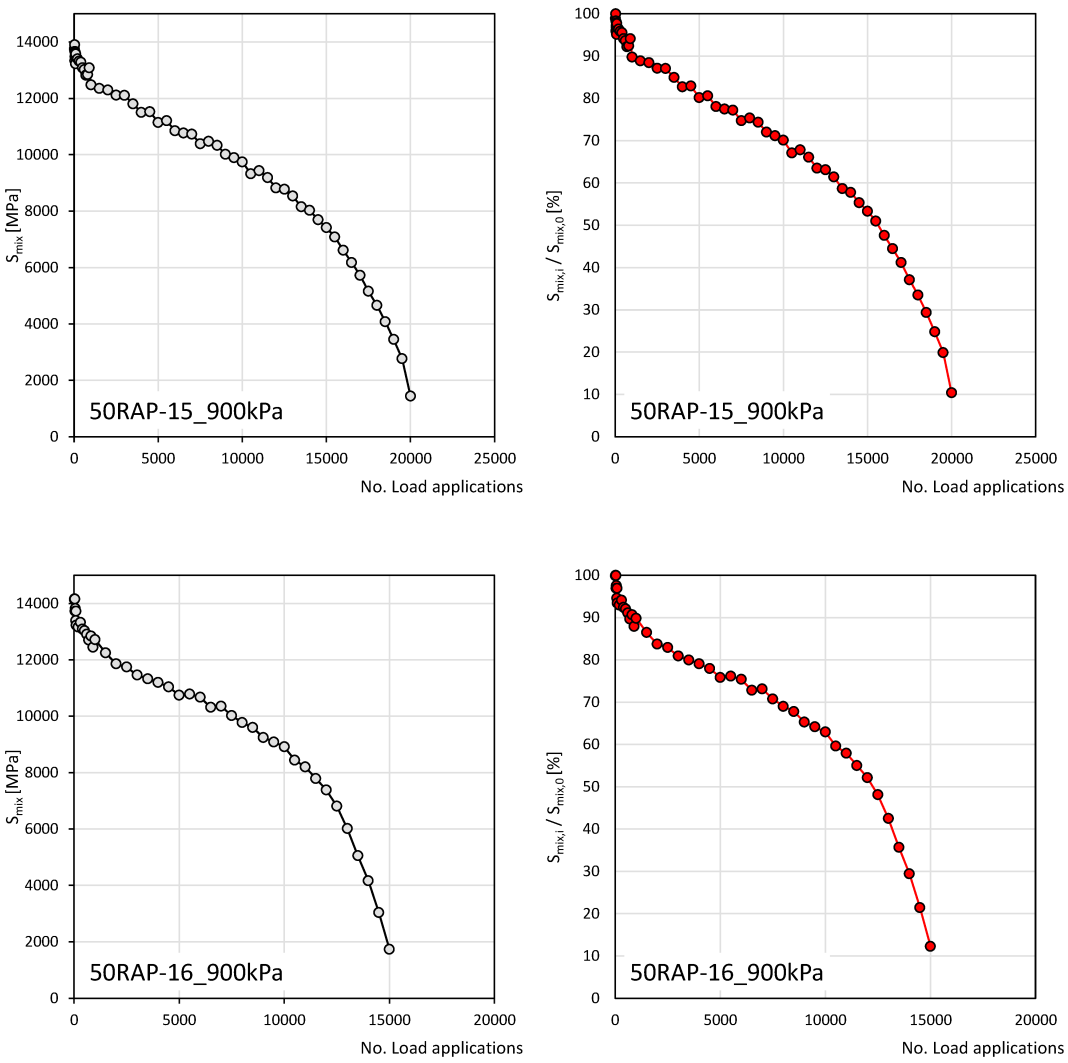




Carico 900 kPa:







La prima prova svolta, con un carico di 600 kPa è stata effettuata su un solo provino in quanto dallo sviluppo della prova si è capito che il carico applicato era esiguo e avrebbe comportato un rallentamento complessivo del programma sperimentale senza apportare un contributo positivo ai risultati finali.

Fracture Life				
Specimen	**Target stress [kPa]**	**Initial Stiffness [MPa]**	**Initial dynamic strain [µm/m]**	**Initial permanent horizontal strain [µm/m]**
50RAP-02	700	12647	113	22
50RAP-08	700	13751	104	17
50RAP-17	700	13442	107	18
50RAP-10	800	13015	126	23
50RAP-12	800	13472	122	18
50RAP-13	800	12695	129	63
50RAP-04	900	13195	140	34
50RAP-15	900	13902	133	20
50RAP-16	900	14164	130	22

Permanent horizontal deformation at $N_{f,tot}$ [mm]	**Permanent vertical deformation at $N_{f,tot}$ [mm]**	**$S_{mix,50}$ [MPa]**	**$N_{f,tot}$**	**$N_{f/50}$**
1.132	2.287	6356	93866	67500
0.805	2.746	6955	85296	61000
0.839	1.672	6687	86256	68000
1.005	2.660	6541	39096	26500
0.708	1.506	6725	40346	32000
0.780	2.190	6370	33386	25500
0.906	2.156	6636	19046	13500
1.135	1.846	7084	20056	15500
0.619	1.294	7103	15076	12250

Tabella 3.13: Risultati prova a fatica mix 2 - 50 RAP

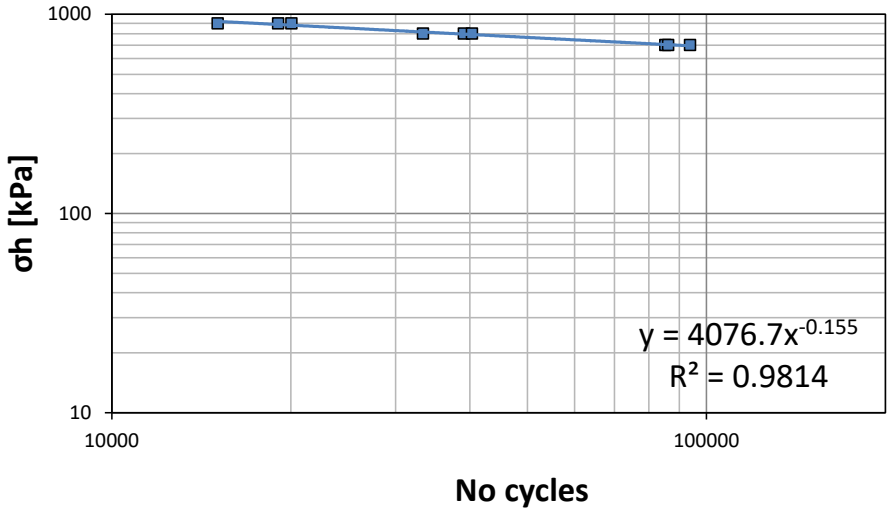


Figura 3.11: Interpolazione dati prova a fatica

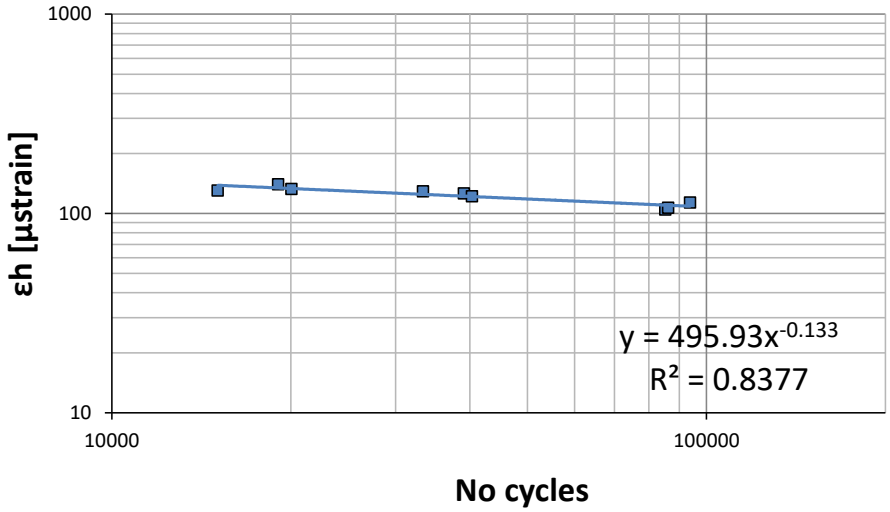


Figura 3.12: Interpolazione dati prova a fatica

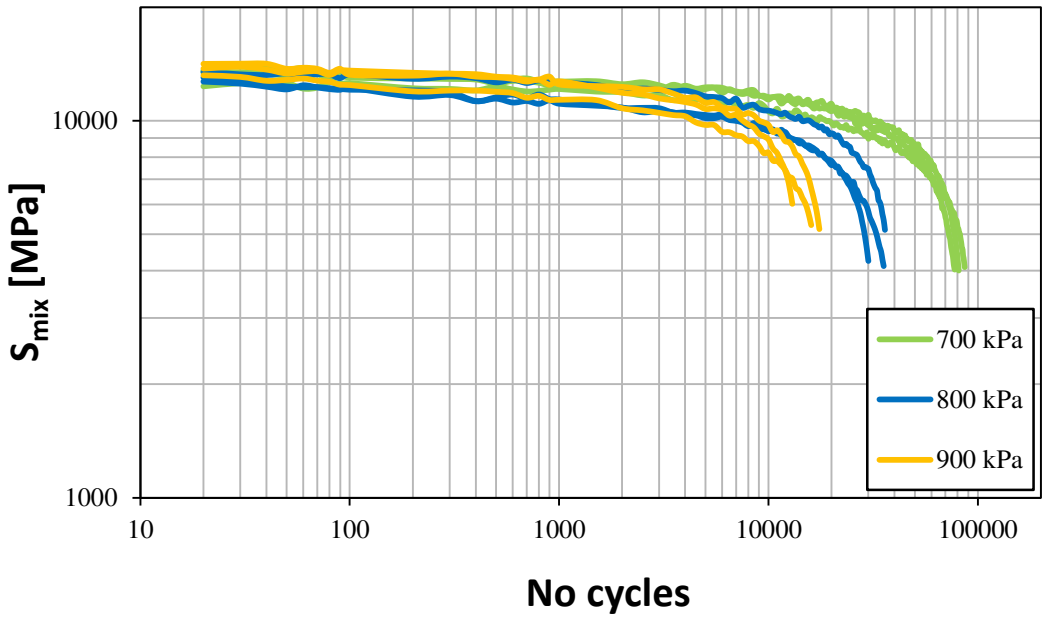


Figura 3.13: confronto andamento prova singoli provini (piano semilogaritmico)

3.4. Mix 3 – 50 RAP + ADDITIVO

Il terzo impasto è stato realizzato aggiungendo alla miscela di aggregati vergini, il RAP come per la seconda miscela ma , in questo impasto, è stato aggiunto anche l'additivo col fine di migliorare le prestazioni meccaniche del materiale.

Di seguito viene riportati gli elementi impiegati nella miscela (tabella 3.14) e le percentuali in peso e volume degli aggregati utilizzati (tabella 3.15)

tipo di legante	bitume vergine
tipo di aggregati	calcarei
RAP	50%
Additivo	si
quantità di legante	
% bit dal RAP	2.2%
% bit vergine (sull'agg.)	3.0%
% bit totale (sul mix)	5.3%
% bit totale (sull'agg.)	5.6%
% bit vergine (sul mix)	3.1%

Tabella 3.14: elementi impiegati nella miscela

	Filler	Sabbia	Calcare 8/16	Calcare 12/16	RAP Grosso	RAP Fino
% volume	3.8	9.6	12.5	22.1	19.2	28.8
% peso	4.0	10.0	13.0	23.0	20.0	30.0

Tabella 3.15: percentuali in peso e volume degli aggregati impiegati

Andando a calcolare ed analizzare la percentuale dei vuoti dei singoli provini, si è riscontrato che tendenzialmente in questo terzo impasto il tenore dei vuoti rientra perfettamente nel range di valori definito da capitolato, al più di un provino.

Nella pagina seguente è riportata la tabella di calcolo dei vuoti di tutti e 18 i provini della miscela realizzati attraverso la pressa a taglio giratorio a 100 giri.

No. Provino	No. Giri	m [g]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h4 [mm]	hm [mm]
1	100	1086	58.1	58.2	58.7	58.1	58.28
2	100	1091.3	58.5	58.4	58.3	58.5	58.43
3	100	1084.6	57.9	58.3	58.2	58.3	58.18
4	100	1087.5	58.6	58.3	58.4	58.9	58.55
5	100	1082.3	58.3	57.7	57.7	57.5	57.80
6	100	1084.7	58.3	58.3	58.3	58.3	58.30
7	100	1085.5	58.5	58.3	58.4	58.4	58.40
8	100	1073.7	58.2	58.3	58.5	58.4	58.35
9	100	1072.6	58.2	58.1	58	58.1	58.10
10	100	1079.3	57.7	58.2	57.8	57.5	57.80
11	100	1091	58.3	58.4	58.3	58.2	58.30
12	100	1079.6	58	57.9	58.2	58.4	58.13
13	100	1085.6	57.9	58.3	58.4	58.1	58.18
14	100	1079.5	57.9	57.8	58.2	57.7	57.90
15	100	1089.3	58.5	58.3	59	58.5	58.58
16	100	1075.7	57.5	57.2	58.2	57.5	57.60
17	100	1071.1	57.4	57.3	57.9	57.3	57.48
18	100	1073	57.9	57.9	58.1	58.2	58.03

No. Provino	ρb,geom [g/cm3]	Pb [%]	Pa [%]	ρB [g/cm3]	ρA [g/cm3]	ρm [g/cm3]	Vm,geom [%]
1	2.373	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.0
2	2.378	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.7
3	2.374	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.9
4	2.365	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.3
5	2.384	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.5
6	2.369	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.1
7	2.367	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.2
8	2.343	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.2
9	2.351	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.9
10	2.378	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.8
11	2.383	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.6
12	2.365	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.3
13	2.376	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.8
14	2.374	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.9
15	2.368	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.2
16	2.378	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.8
17	2.373	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.0
18	2.354	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.7

Tabella 3.16: calcolo del volume dei vuoti mix 3 - 50 RAP + ADDITIVO

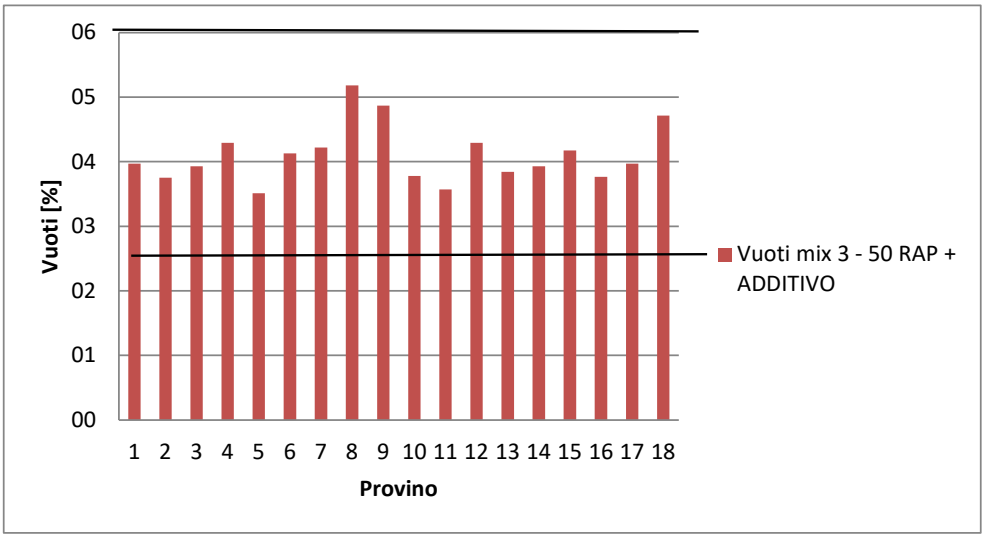


Figura 3.14: istogramma confronto vuoti

Di seguito vengono riportati i risultati elaborati a partire dai dati estratti dalle prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta e prova a rottura a trazione indiretta. Queste due prove sono state svolte sui primi 4 provini della miscela.

MIX 3 - 50 RAP + ADDITIVO		
Provino	**Diagonale**	**ITSM [Mpa]**
1	1	14403
	2	14456
2	1	15235
	2	14039
3	1	15417
	2	15958
4	1	16330
	2	15954
Media		15224.0

Tabella 3.17: Risultati prova modulo trazione indiretta mix 3 - 50 RAP + ADDITIVO

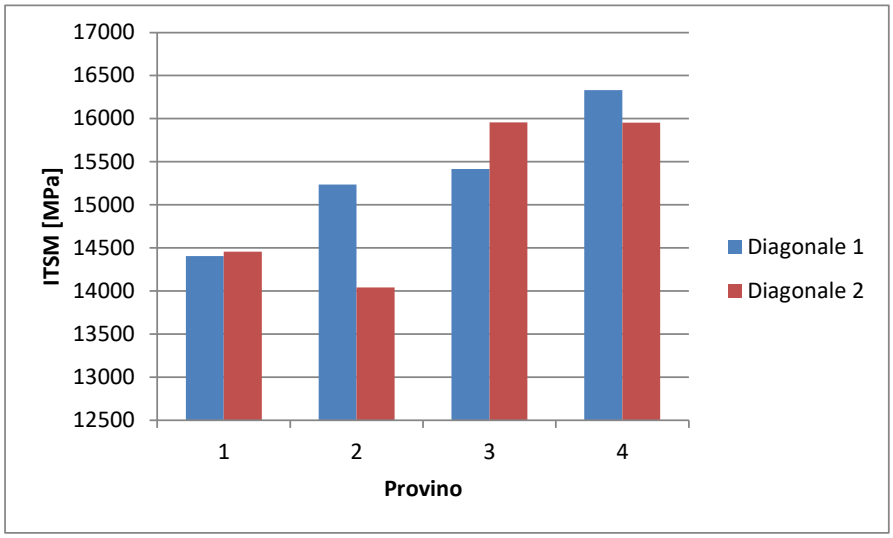


Figura 3.15: Istogramma prova modulo trazione indiretta mix 3 - 50 RAP + ADDITIVO

MIX 2 - 50 RAP + ADDITIVO			
Provino	**ε_{rot} [mm/mm]**	**ITS [Mpa]**	**CTI [Mpa]**
1	0.030631	1.476	75.65
2	0.028478	1.478	81.48
3	0.028399	1.536	84.92
4	0.029748	1.543	81.43
Media	0.02931	1.508	80.87

Tabella 3.18: Risultati prova rottura trazione indiretta

In quest'ultima miscela i valori di ITS in media, anche se di poco, rientrano nel limite massimo previsto dal capitolato di riferimento. Per quanto riguarda i valori di CTI, risultando elevati rispettano il limite imposto dal capitolato.

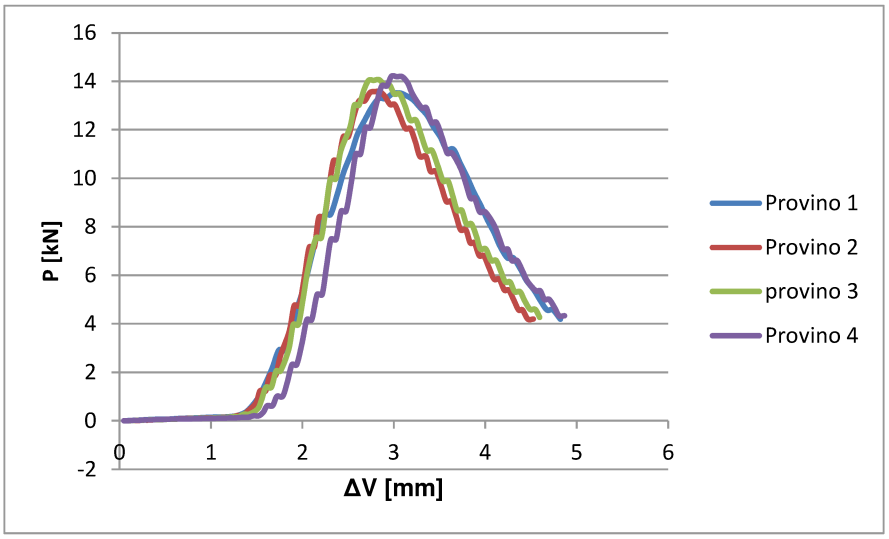
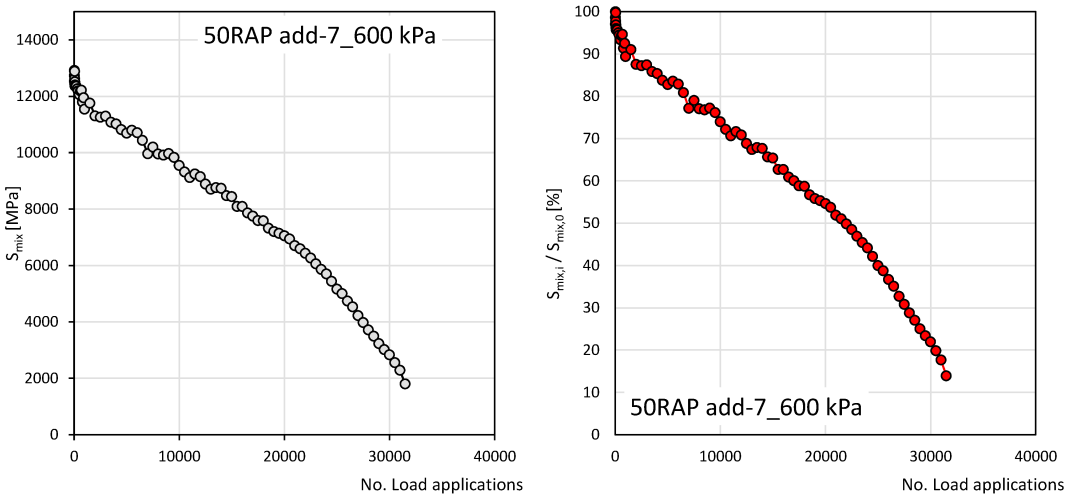


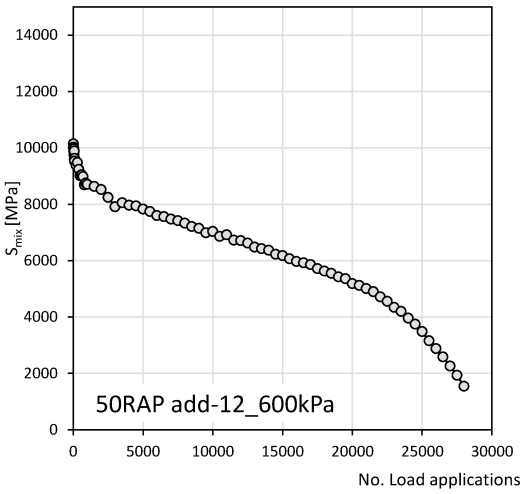
Figura 3.16: grafico carico-corsa prova trazione indiretta mix 3 - 50 RAP + ADDITIVO

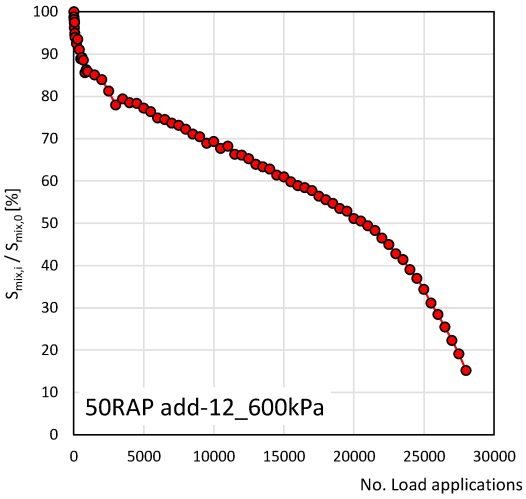
Successivamente alle due prove precedenti, si è effettuata la prova a fatica sui restanti provini. La prova si è svolta andando a definire tre livelli di carico per ognuno dei quali si è sottoposto a tale prova almeno 3 provini. Di seguito vengono riportati i risultati della prova a fatica di tutti i provini della prima miscela sotto forma di grafici.

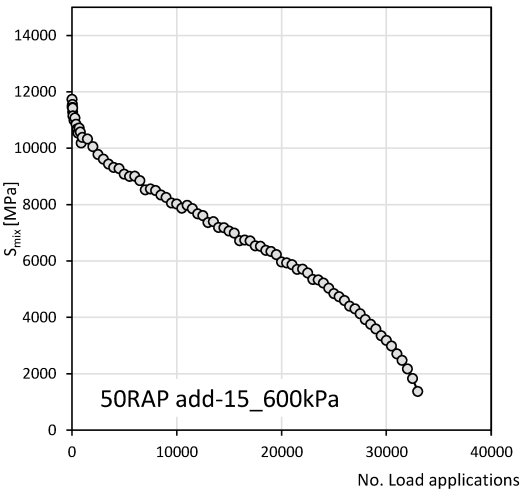
NOTA: nei seguenti grafici è riportato nome miscela – numero provino – carico applicato

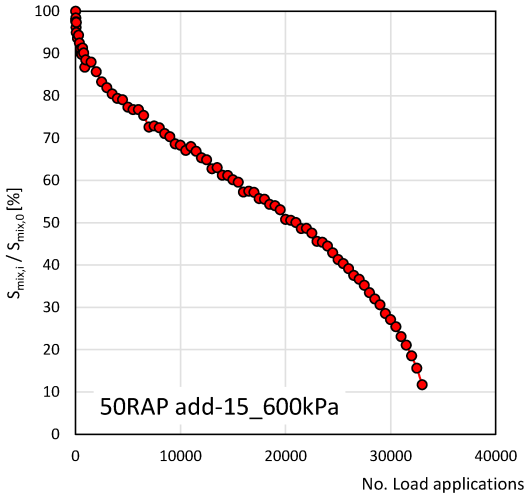
Carico 600 kPa:



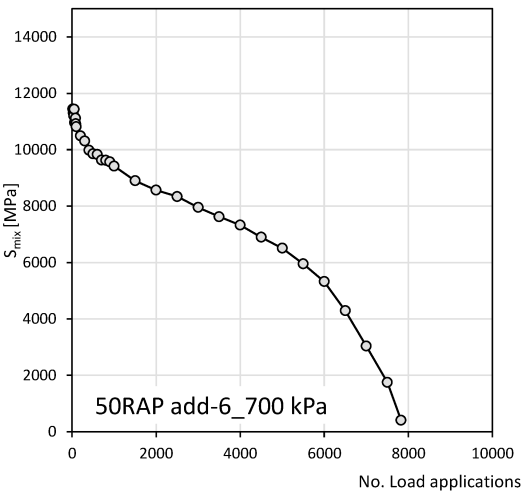


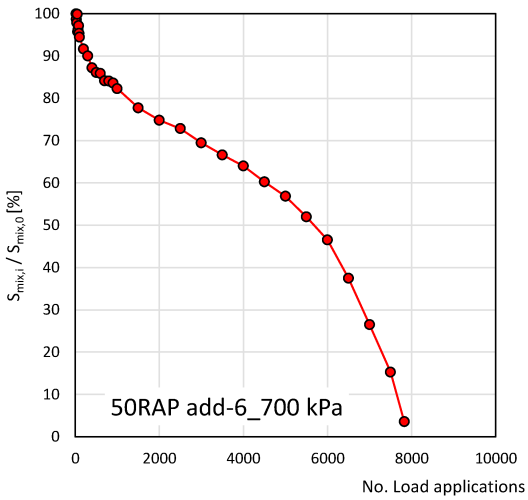


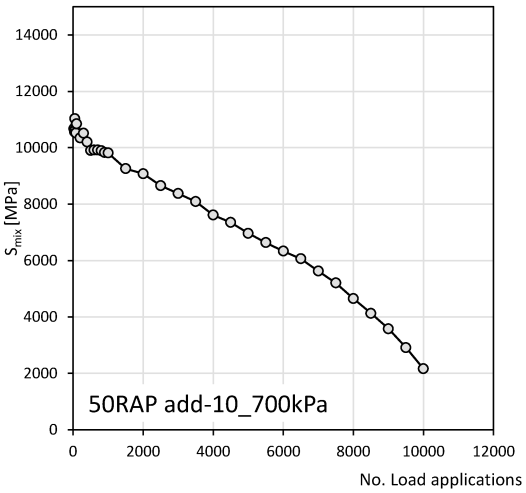


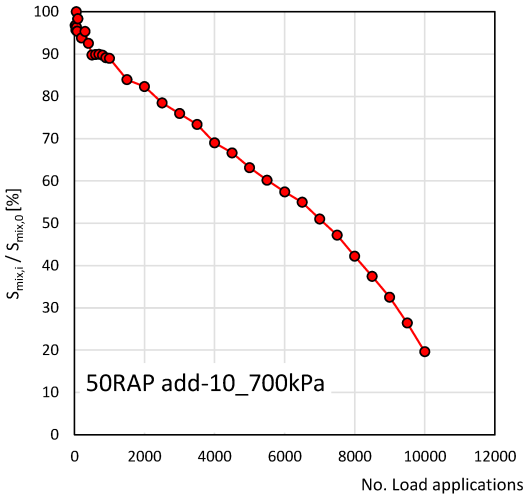


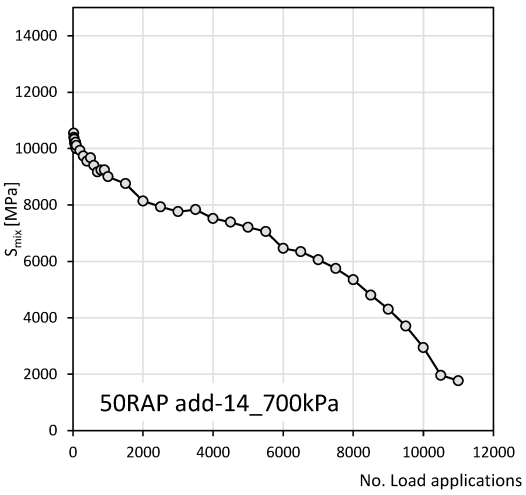
Carico 700 kPa:

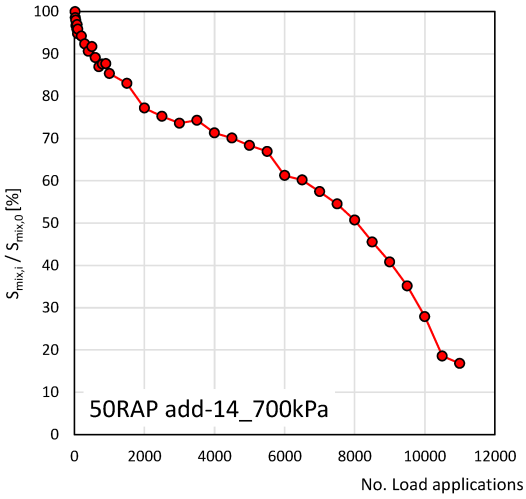




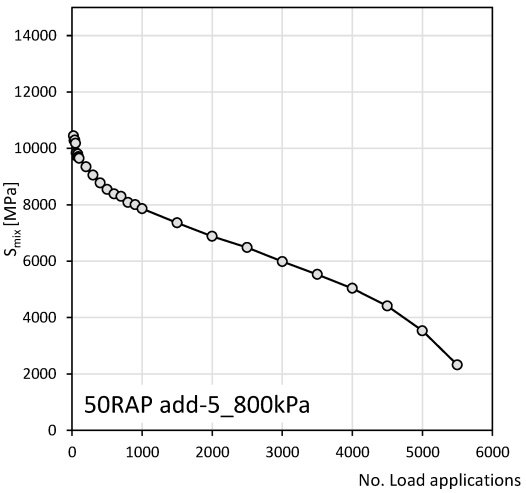


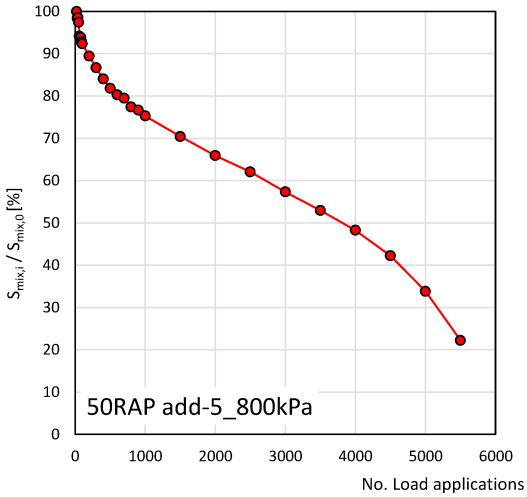


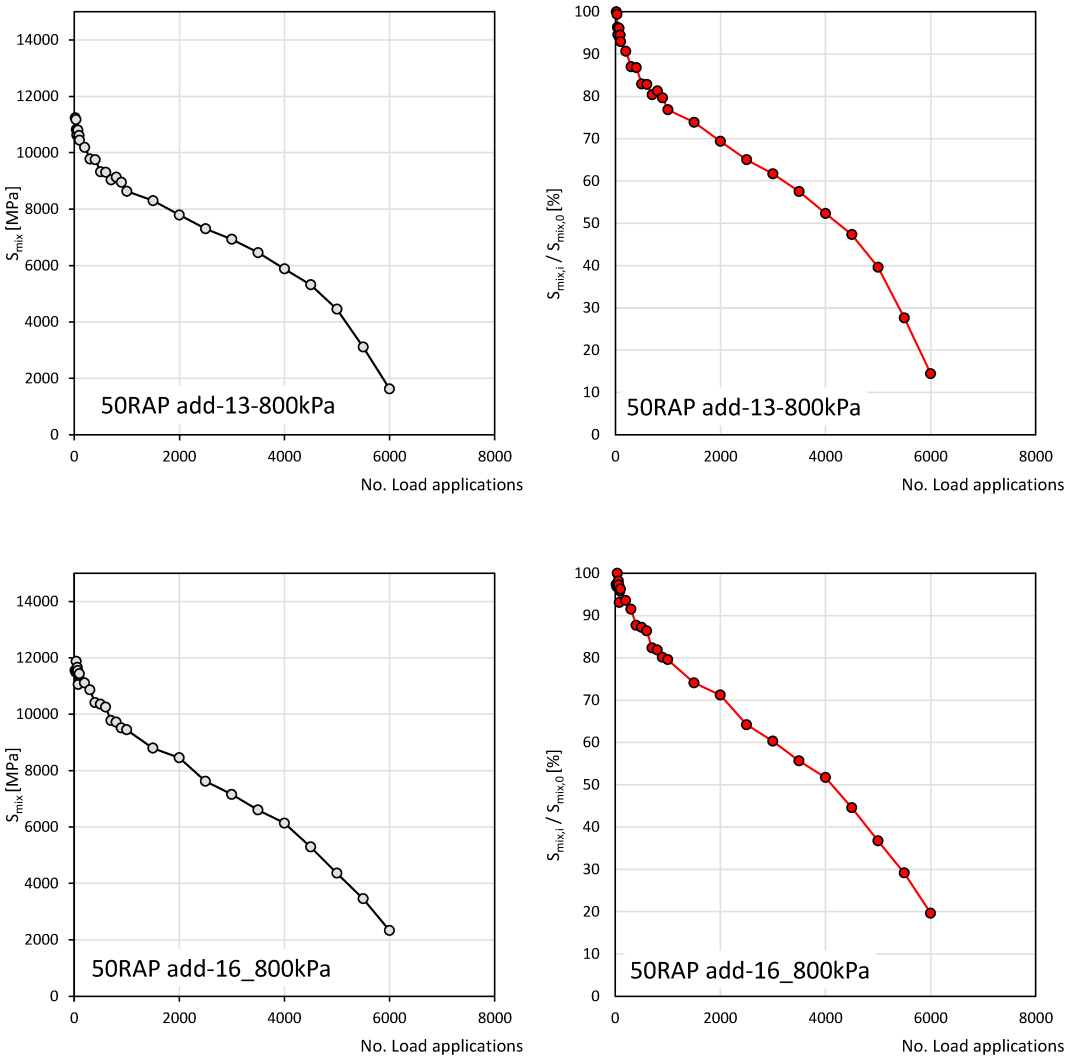




Carico 800 kPa:







La prima prova svolta, con un carico di 900 kPa è stata effettuata su un solo provino in quanto dallo sviluppo della prova si è capito che il carico applicato era troppo elevato e avrebbe comportato una rottura molto rapida dei provini con un numero di cicli prossimo al minimo per ritenere la prova valida.

Fracture Life				
Specimen	Target stress [kPa]	Initial Stiffness [MPa]	Initial dynamic strain [µm/m]	Initial permanent horizontal strain [µm/m]
50RAP-LP1-07	600	12912	95	16
50RAP-LP1-12	600	10145	121	27
50RAP-LP1-15	600	11735	105	23
50RAP-LP1-06	700	11448	125	25
50RAP-LP1-10	700	11034	130	72
50RAP-LP1-14	700	10548	136	0
50RAP-LP1-05	800	10446	157	28
50RAP-LP1-13	800	11238	146	48
50RAP-LP1-16	800	11874	138	29

Permanent horizontal deformation at $N_{f,tot}$ [mm]	Permanent vertical deformation at $N_{f,tot}$ [mm]	$S_{mix,50}$ [MPa]	$N_{f,tot}$	$N_{f/50}$
0.544	1.609	6431	31926	22000
1.219	2.605	5122	28556	20500
0.878	2.004	5868	33326	21000
0.372	1.121	5951	7826	5500
0.864	2.663	5628	10686	7000
0.646	2.113	5348	11036	8000
0.292	0.403	5041	5996	4000
0.491	1.241	5881	6266	4000
0.325	1.548	6141	6416	4000

Tabella 3.19: Risultati prova a fatica mix 3 - 50 RAP + ADDITIVO

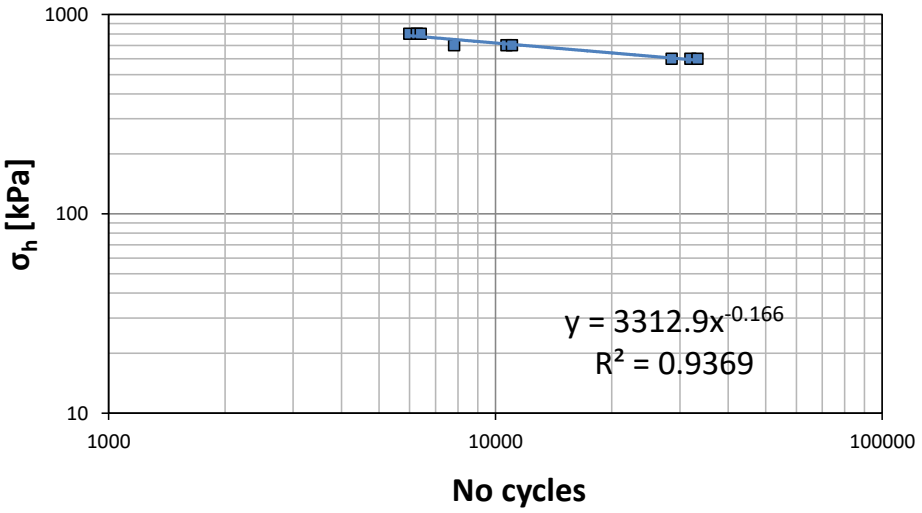


Figura 3.17: Interpolazione dati prova a fatica

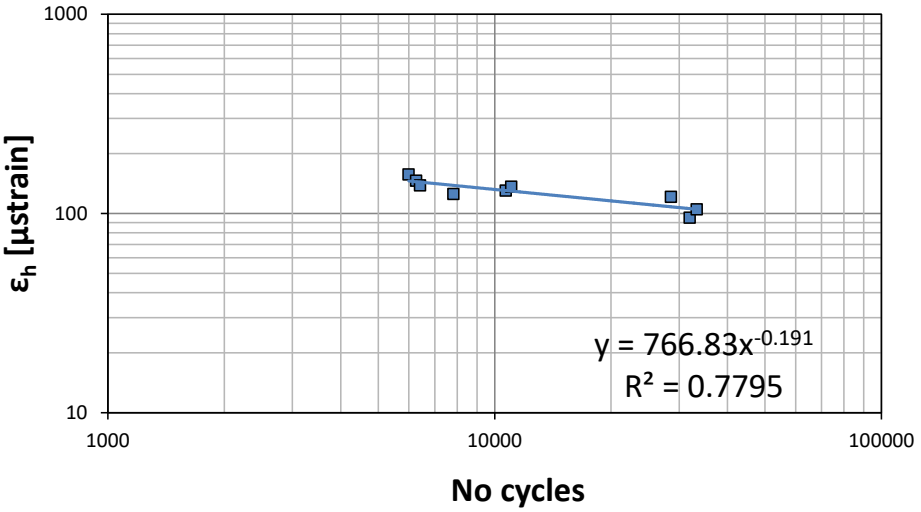


Figura 3.18: Interpolazione dati prova a fatica

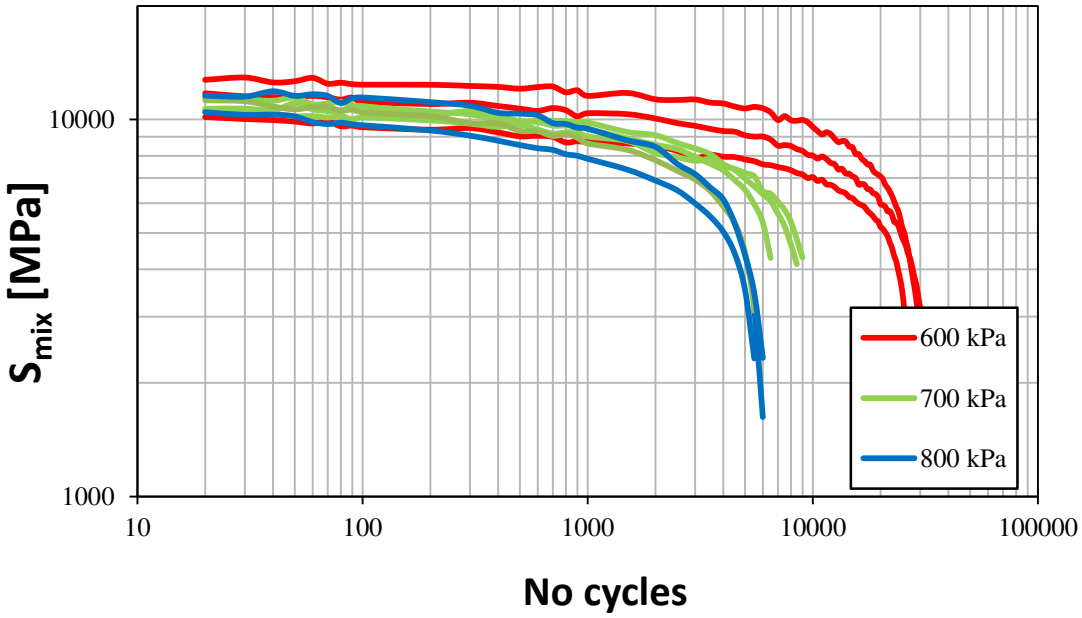


Figura 3.19: Confronto andamento prove singoli provini (piano semilogaritmico)

3.5. Confronto prestazionale tra le 3 miscele testate

In questo paragrafo verrà effettuato un rapido confronto dei risultati ottenuti dalle tre miscele testate, mentre verrà definito un giudizio complessivo sulla sperimentazione nel capitolo successivo ovvero nelle conclusioni.

Nella tabella 3.20 vengono messi a confronto la media dei vuoti caratteristici delle tre miscele e nella figura 3.20 vengono riportati in un istogramma.

vuoti [%]	00 RAP	50 RAP	50 RAP + add
media	6.2	4.4	4.1

Tabella 3.20: confronto vuoti medi miscele

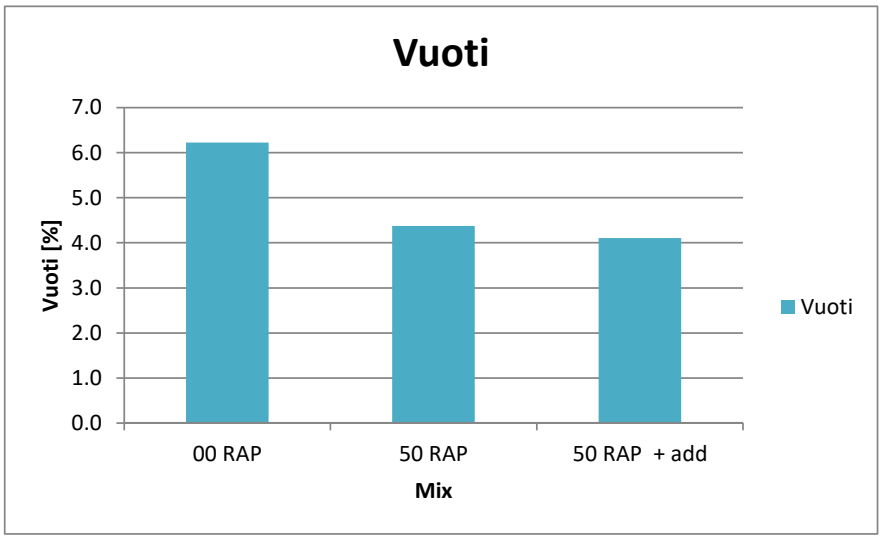


Figura 3.20: istogramma confronto vuoti medi miscele

Analizzando la media dei vuoti delle tre miscele si può dire che tutte e tre mediamente possono considerarsi all'interno delle specifiche di capitolato, anche se la prima, 00 RAP, risulta leggermente superiore al limite massimo.

Nelle prossime tabelle verranno messi a confronto i valori ottenuti dalle prove di caratterizzazione meccanica ITS (tab. 3.21), CTI (tab. 3.22), deformazione a rottura (tab. 3.23) e ITSM (tab. 3.24) con i relativi istogrammi in cui vengono confrontati i 4 provini su cui sono state effettuate le prove.

	ITS [Mpa]		
prov n°	00 RAP	50 RAP	50 RAP + add
1	1.087	1.897	1.476
2	1.132	1.856	1.478
3	1.118	2.045	1.536
4	1.056	2.012	1.543

Tabella 3.21: confronto valori ITS miscele

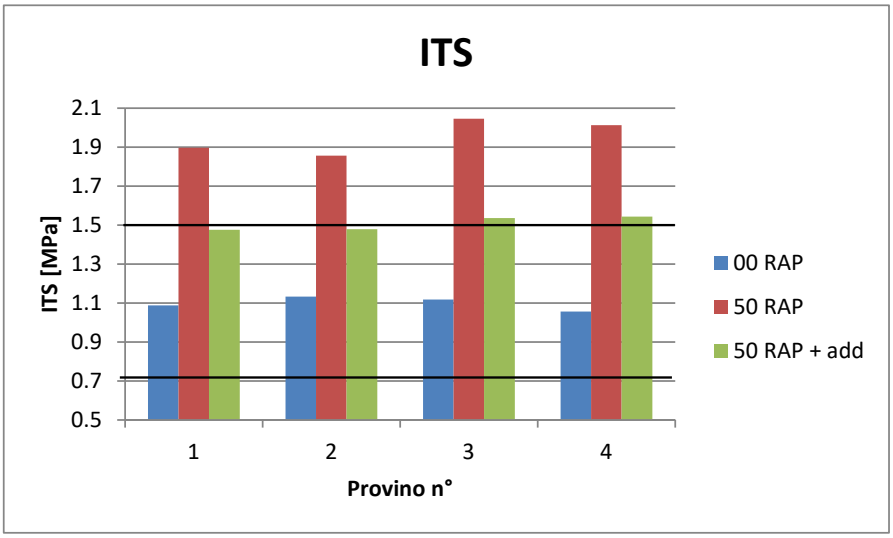


Figura 3.21: istogramma confronto ITS miscele

Dal confronto dei valori ottenuti di ITS per le 3 miscele si può osservare che la prima miscela, 00 RAP, è ampiamente nei limiti di capitolato; la seconda miscela, contenente 50% RAP, invece supera vistosamente i limiti di capitolato, entro i quali si rientra con i valori ottenuti analizzando la terza miscela in cui si è aggiunto l'additivo rigenerante.

	CTI [Mpa]		
prov n°	00 RAP	50 RAP	50 RAP + add
1	58.4	102.1	75.7
2	54.3	92.9	81.5
3	59.1	109.2	84.9
4	57.6	82.6	81.4

Tabella 3.22: confronto valori CTI miscele

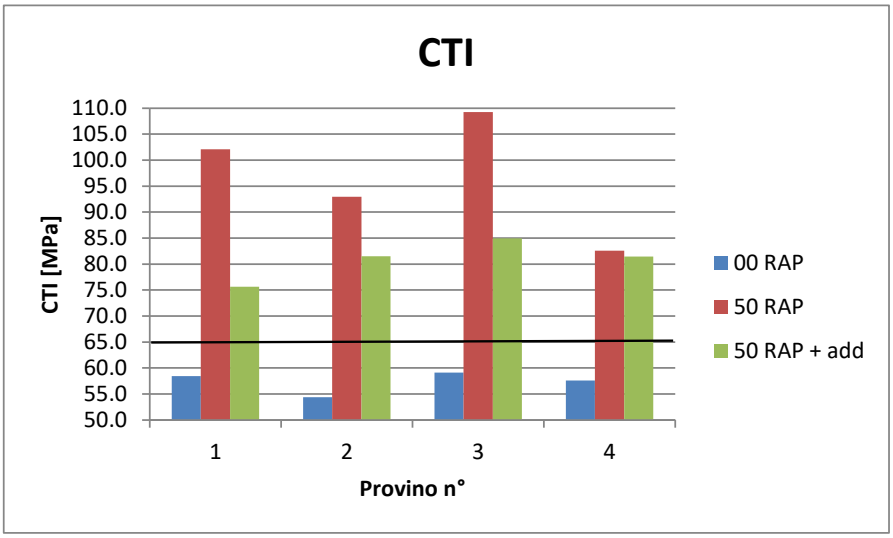


Figura 3.22: istogramma confronto CTI miscele

Analizzando i valori di CTI delle tre miscele si può osservare che per quanto riguarda le due miscele contenenti 50% RAP si supera per entrambe ampiamente il valore limite imposto dal capitolato, mentre co la prima miscela si è leggermente al di sotto di tale limite.

	ε_{rot} [mm/mm]		
prov n°	00 RAP	50 RAP	50 RAP + add
1	0.0292	0.0292	0.0306
2	0.0327	0.0314	0.0285
3	0.0297	0.0294	0.0284
4	0.0288	0.0383	0.0297

Tabella 3.23: confronto valori deformazioni a rottura miscele (traz ind)

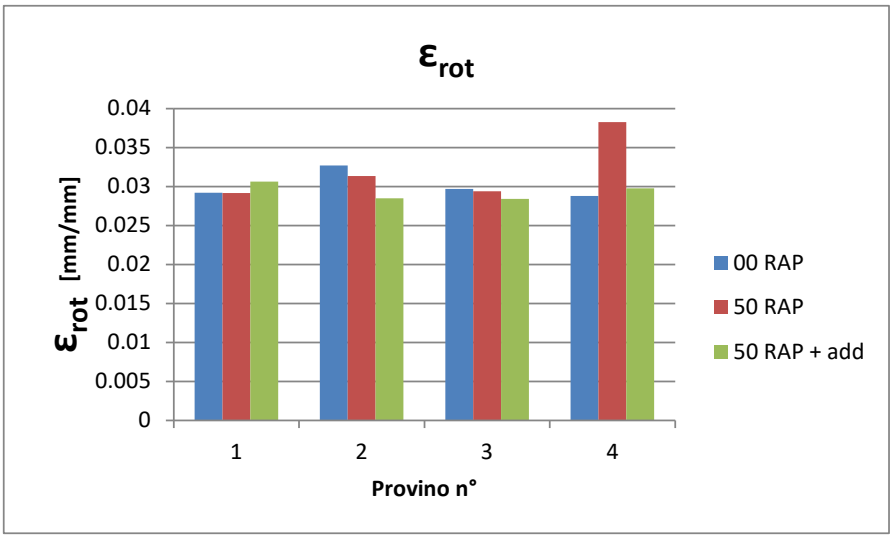


Figura 3.23: istogramma confronto valori deformazioni a rottura miscele (traz ind)

	ITSM		
	00 RAP	50 RAP	50 RAP + add
prov 1	5739	16360	14403
	5584	15774	14456
media	5661.5	16067	14429.5
prov 2	7431	14413	15235
	7163	15474	14039
media	7297	14943.5	14637
prov 3	6817	14779	15417
	6670	14844	15958
media	6743.5	14811.5	15687.5
prov 4	6375	16303	16330
	6228	15183	15954
media	6301.5	15743	16142

Tabella 3.24: confronto valori ITSM miscele

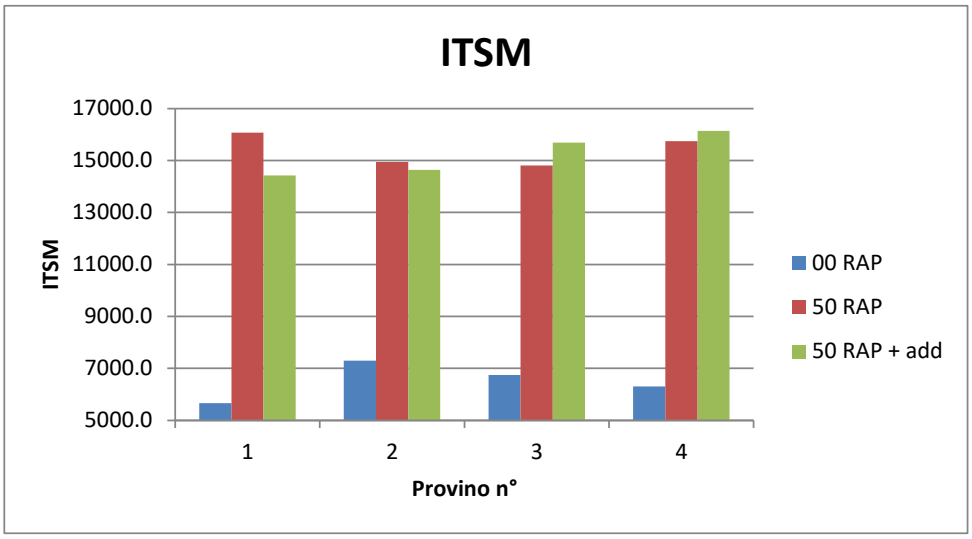


Figura 3.24: istogramma confronto valori ITSM miscele

Osservando l'andamento dei valori di ITSM delle tre miscele si può osservare come l'aggiunta di RAP in tali quantità causa un'importante aumento della rigidezza del materiale finale e anche con l'aggiunta dell'additivo rigenerante i valori rimangono molto distanti a quelli ottenuti dalla prima miscela. Quindi si può concludere che l'aggiunta di additivo rigenerante è più influente sui valori di ITS che di ITSM.

Nelle figure 3.25 e 3.26 vengono riportati e confrontate le linee di tendenza delle miscele, derivanti dai risultati sperimentali delle prove a fatica effettuate sulle tre miscele.

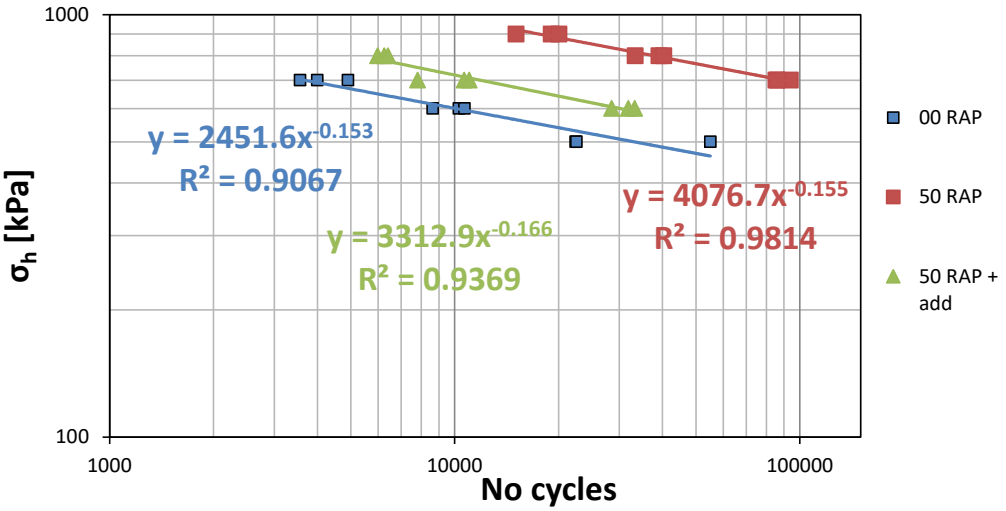


Figura 3.25: grafico confronto tensione - numero di cicli a rottura miscele

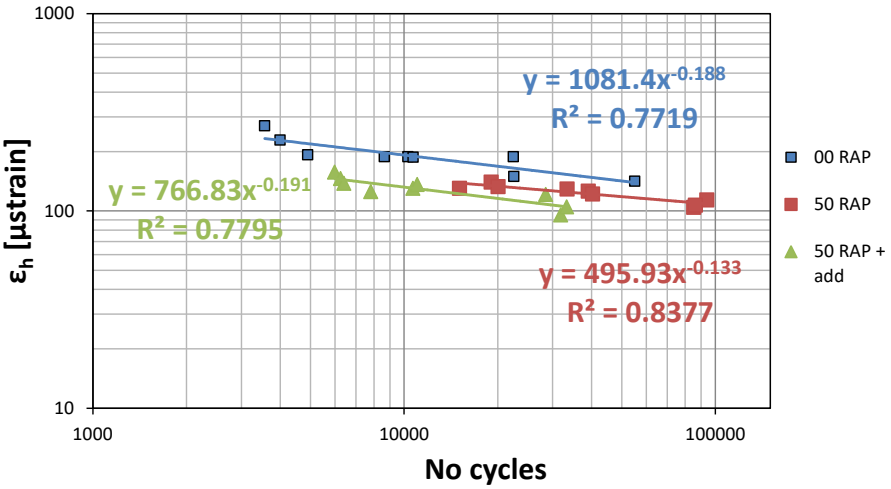


Figura 3.26: grafico confronto deformazione - numero di cicli a rottura miscele

Conclusioni

La sperimentazione descritta nella presente tesi, è parte del più ampio progetto di ricerca del Dipartimento Strade dell'Università Politecnica delle Marche, sul riciclaggio delle pavimentazioni e più in particolare nel riciclaggio a caldo che si prepone come obbiettivo un riutilizzo nelle miscele di conglomerato bituminoso fino al 50% sull'aggregato totale del RAP.

Il riutilizzo del RAP, o fresato, presenta questi vantaggi:

- Riduzione delle materie prime vergini estratte da cava (vantaggio economico e ambientale)
- Riduzione spesa trasporto e smaltimento del fresato (vantaggio economico)
- Diminuzione del fresato da smaltire in discarica (vantaggio ambientale)

Lo sviluppo del programma sperimentale della presente tesi ha previsto l'esecuzione delle indagini su provini di conglomerato bituminoso di tre differenti tipologie

- Conglomerato bituminoso vergine
- Conglomerato bituminoso con contenuto del 50% RAP
- Conglomerato bituminoso con contenuto del 50% RAP con aggiunta di additivo rigenerante

per valutarne e metterne al confronto le caratteristiche volumetriche e meccaniche.

Attraverso la sperimentazione svolta in laboratorio, si possono estrapolare i seguenti risultati per le miscele realizzate:

- Conglomerato bituminoso vergine: miscela realizzata con aggregati calcarei vergini e bitume vergine. I vuoti calcolati per i vari provini, in linea generale, sono risultati intorno al limite superiore dell'intorno definito dal capitolato preso in esame (3% - 6%); questa discrepanza probabilmente è dovuto ad un prolungamento eccessivo della fase compresa tra l'estrazione del forno del materiale miscelato e della sua compattazione, che ne ha causato un lieve raffreddamento con conseguente minor efficienza della fase di compattazione. Nonostante questo, i valori derivanti dalle prove di caratterizzazione meccanica come i valori di resistenza a trazione indiretta (ITS) sono nettamente inferiori rispetto al limite superiore imposto dal capitolato.

- Conglomerato bituminoso con contenuto del 50% RAP: miscela realizzata con 50% aggregati vergini e 50% RAP e bitume vergine. La valutazione dei vuoti di questa miscela ha mostrato valori che rientrano quasi tutti nell'intervallo di valori accettabili definito nel capitolato di riferimento (3% - 5%). Questo risultato ha permesso di confermare l'ipotesi sopra citata, ovvero raffreddamento eccessivo della miscela causato dal prolungamento della fase transitoria precedente alla compattazione, in quanto si è cercato di velocizzare la fase di trasferimento del conglomerato dal forno al macchinario per la compattazione dei provini. I risultati derivanti dalla caratterizzazione meccanica hanno mostrato che l'inserimento di un quantitativo tale di RAP nella miscela, senza l'impiego di nessun tipo di additivo rigenerante, comporta un peggioramento importante nelle prestazioni del materiale. Infatti i valori di ITSM ottenuti sono, tendenzialmente, tre volte superiori a quelli ottenuti dalla sperimentazione sulla miscela precedente e i valori di ITS sono ampiamente superiori al limite definito dal capitolato di riferimento: questo ci permette di concludere che una miscela di questa tipologia è molto più rigida di un conglomerato bituminoso vergine. Inoltre confrontando i risultati derivanti dalle prova a fatica, quindi andamento delle prove e numero di cicli a rottura, si è evidenzia un maggiore fragilità nel conglomerato bituminoso contente RAP.

- Conglomerato bituminoso con contenuto del 50% RAP con aggiunta di additivo rigenerante: miscela realizzata con 50% aggregati vergini e 50% RAP e bitume vergine con aggiunta di additivo rigenerante a base di olio vegetale. I vuoti dei provini di questa miscela, in media, sono tutti prossimi o inferiori al 4% e questo primo risultato oltre a assicurarci che la fase di miscelazione e compattazione è stata corretta ci permette di dire che l'additivo immesso nella miscela ha sagito da fluidificante: ovvero ha contribuito a fluidificare il bitume ossidato presente nel RAP e che a sua volta è andato a occludere parte della porosità. Dai risultati delle prove meccaniche si evince che in termini di ITSM si è registrato un leggero decremento, anche se i valori rimangono comunque molto più elevati rispetto alla prima miscela senza fresato, mentre in termini di ITS l'aggiunta dell'additivo ha permesso di rientrare, anche se non ampiamente, nei limiti definiti dal capitolato. Un metodo per abbassare ulteriormente ITSM ed ITS è quello di diminuire la temperatura di riscaldamento del bitume vergine all'interno del forno. Si è notato infatti che, scaldare circa 500g di bitume vergine a 170°C comporta un'elevata ossidazione dello stesso, molto superiore a quella che il bitume subisce durante le fasi di miscelazione in impianto. Per simulare quindi cosa

succede in sito, occorre abbassare la temperatura di riscaldamento del legante di alcune decine di gradi. Anche attraverso il paragone tra le prove a fatica svolte sulle ultime due miscele, entrambe caratterizzate dalla presenza di RAP, si può individuare un leggero miglioramento nel comportamento della miscela caratterizzata dalla presenza dell'additivo rigenerante.

In conclusione si può affermare che, nonostante l'importante differenza che intercorre tra i risultati ottenuti dalla miscela contenente esclusivamente materiale vergine e quella contente RAP e additivo, quest'ultima grazie all'impiego dell'additivo è caratterizzata da valori in linea con quelli stabiliti dal capitolato di riferimento. Quindi anche se la miscela additivata risulta essere caratterizzata da un livello di rigidezza abbastanza elevato, essendo dotata di caratteristiche meccaniche (ITS e CTI) al di sotto del limite massimo stabilito dal capitolato di riferimento si può affermare che l'additivo impiegato e le quantità utilizzate per la realizzazione della miscela risultano essere adeguate per un eventuale impiego nel rifacimento di pavimentazioni stradali.

Bibliografia

[1] Felice A. Santagata – TEORIA E TECNICA DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI - vol. 1 – progettazione (2016)

[2] Felice A. Santagata – TEORIA E TECNICA DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI - vol. 2 – costruzione, gestione e manutenzione (2016)

[3] Paolo Ferrari, Franco Giannini – INGEGNERIA STRADALE – vol. 2 – corpo stradale e pavimentazioni

[4] ANAS – CAPITOLATO SPECIALE DI APPALTO – norme tecniche per l'esecuzione del contratto – parte 2

[5] *UNI EN 12697-5* – "Calcolo della massa volumica degli aggregati"

[6] UNI EN 12697-26 del 2004 – "Metodi di prova per la stima della Rigidezza di conglomerati bituminosi a caldo"

[7] UNI EN 1267-23 del 2006 – "Metodi di prova per la stima della resistenza a trazione indiretta per conglomerati bituminosi a caldo"

Sitografia

[1] http://www.saicambiente.net/imp_cong_ciclo.htm

[2] http://static.starasphalt.com/info_ACF-Rigeneranti.pdf

[3] https://www.polycykle.com/prodotti/

[4] https://www.dicea.univpm.it/labstrade-riciclaggio-delle-pavimentazioni

[5] http://www.treccani.it/enciclopedia/calcare_%28Enciclopedia-dei-ragazzi%29/

[6] https://it.wikipedia.org/wiki/Filler_(ingegneria)

[7] http://www.mecacisa.com/wp-content/uploads/2016/02/Cooper_brochure_2011.pdf