



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2022

**L'influenza degli additivi
rigeneranti sul comportamento
meccanico di miscele bituminose
ad elevato contenuto di fresato**

Relatori:

Prof. Ezio Santagata

Candidato:

Marco Chionchio

Correlatori:

Prof. Davide Dalmazzo

Prof. Pier Paolo Riviera

Ing. Leonardo Urbano

A mio nipote

ABSTRACT

Nell'ottica di una transizione verso una visione circolare dell'economia, il settore delle costruzioni delle infrastrutture di trasporto riveste un ruolo di primo piano nella sostenibilità ambientale attraverso vari fattori quali, tra gli altri, il consumo di materie prime non rinnovabili e di risorse energetiche. Di conseguenza, quello della sostenibilità economica ed ambientale diviene un concetto chiave nella progettazione e realizzazione delle infrastrutture di trasporto.

Per perseguire la circolarità economica e raggiungere gli obiettivi legati alla sostenibilità, nel campo delle costruzioni stradali si dà sempre più spazio al riciclaggio di materie prime secondarie, prima su tutte il fresato bituminoso.

Il fresato bituminoso, noto anche come Reclaimed Asphalt (RA), è largamente utilizzato all'interno delle miscele bituminose prodotte a caldo per la realizzazione di pavimentazioni flessibili. Si ottiene per fresatura di pavimentazioni ormai ammalorate ed il suo riutilizzo permette di soddisfare i requisiti di sostenibilità ambientale precedentemente menzionati in quanto riduce il consumo di materie prime vergini (aggregati e bitumi) ed i conseguenti impatti legati alla loro produzione e trasporto, limita gli impatti legati al loro smaltimento e consente di ottimizzare i costi di costruzione.

Di contro, il fresato bituminoso risulta essere, da un punto di vista tecnico, un materiale complesso a causa della sua intrinseca eterogeneità, dell'incertezza sull'origine dei suoi costituenti (aggregati, bitume, eventuali additivi), della quantità di bitume che si riattiva e partecipa al "blending" col bitume vergine.

Proprio il legante contenuto nel fresato bituminoso rappresenta un aspetto di criticità (a causa della sua elevata rigidità) che deve essere necessariamente valutato con

estrema accuratezza. Infatti, se il riciclaggio è spinto verso elevate quantità (superiori al 20%), l'eccessivo apporto di bitume invecchiato può compromettere le prestazioni complessive della miscela finale, penalizzando in particolar modo la resistenza a fatica ed alle basse temperature.

Reimpiegare elevate percentuali (anche superiori al 50%) diviene possibile attraverso la rigenerazione del bitume invecchiato per mezzo dei cosiddetti Additivi Rigeneranti (indicati anche come Rejuvenating Agents). Tali additivi hanno il compito di rigenerare le proprietà chimico-reologiche del legante invecchiato.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di indagare l'effetto degli additivi rigeneranti in miscele bituminose realizzate con elevate percentuali di fresato bituminoso. In particolare, sono state studiate miscele per strato di collegamento contenenti il 50% di fresato e, a fini comparativi, è stata indagata una miscela composta esclusivamente da ingredienti vergini.

Dopo una preliminare fase di mix design con la quale è stata definita la struttura litica e il contenuto di bitume ottimo, si è eseguita una caratterizzazione in campo viscoelastico lineare per valutare il dosaggio di additivo rigenerante, l'analisi della risposta meccanica alle basse e medie temperature e la risposta a fatica delle tre miscele.

Sommario

ABSTRACT	i
INTRODUZIONE.....	1
STATO DELL'ARTE	5
UTILIZZO DEL RA	7
CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI	11
AGGREGATI.....	11
CAMPIONAMENTO E GRANULOMETRIA	12
MASSA VOLUMICA APPARENTE	16
BITUME	18
ADDITIVO	19
FRESATO	20
GRANULOMETRIA.....	21
MASSA VOLUMICA APPARENTE	22
CONTENUTO DI BITUME TRAMITE IGNIZIONE	22
INDAGINE SPERIMENTALE	25
MIX DESIGN – conglomerato bituminoso per strato di collegamento.....	30
PRODUZIONE DELLE MISCELE.....	33
MASSIMA MASSA VOLUMICA TEORICA	35
CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI	36
LAVORABILITA'	39
MASSA VOLUMICA E CONTENUTO DEI VUOTI RESIDUI	41

SAGOMATURA PROVINI E CALIBRAZIONE VUOTI	43
PROVE MECCANICHE	45
PROVA DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA	45
MODULO DINAMICO	48
RESISTENZA A FATICA – Prova di trazione monoassiale diretta ciclica	52
ANALISI DEI RISULTATI.....	57
ANALISI DEI RISULTATI IN FASE DI MIX DESIGN	57
MIX-V	57
MIX-RA	62
MIX-RE	66
SINTESI DATI VOLUMETRICI.....	68
ANALISI DEI RISULTATI IN FASE DI CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI E DEI TEST MECCANICI	69
LAVORABILITA'	69
PROVA DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA	77
MODULO DINAMICO	84
FATICA.....	88
CONCLUSIONI	95
BIBLIOGRAFIA	99

INTRODUZIONE

Il conglomerato bituminoso prodotto a caldo è il materiale più utilizzato per la realizzazione degli strati legati della sovrastruttura stradale. Dopo la costruzione della pavimentazione, con il passare degli anni, la sovrastruttura subisce un progressivo deterioramento con peggioramento delle sue caratteristiche prestazionali, pertanto, al momento del rinnovamento della pavimentazione, viene asportato. Nel settore delle costruzioni stradali, la necessità di uno sviluppo sostenibile si traduce principalmente nel riutilizzo mirato di materiali di recupero ottenuti da svariati settori di produzione.

Il materiale più utilizzato nell'ambito del riciclaggio è il fresato bituminoso, detto anche RA (Reclaimed Asphalt), poiché proviene dal ciclo produttivo del settore stesso delle costruzioni stradali e permette un approvvigionamento in economia. Il suo utilizzo si inquadra bene nel contesto di uno sviluppo di settore orientato ad ottimizzare materiali e risorse energetiche disponibili, privilegiando la sostenibilità ambientale ed economica.

Essendo, per sua stessa natura, un materiale fortemente eterogeneo, poiché ricavato dalla fresatura di pavimentazioni ammalorate composte da miscele bituminose di differente natura, occorre prestare molta cautela quando riutilizzato all'interno di una nuova miscela. Uno degli aspetti più critici da considerare è il bitume in esso contenuto, poiché si presenta ossidato e molto più rigido rispetto a quello di primo utilizzo e, di conseguenza, un suo scorretto impiego aumenta l'insorgere di fenomeni di degrado quali fessurazione per fatica, spogliamento degli aggregati, rottura termica, etc. Per contro, la presenza di tale bitume, come riportato ampiamente in letteratura, fa sì che la miscela finale abbia una migliore resistenza all'ormaiamento.

Allo stato attuale, il conglomerato ricavato dalla fresatura della pavimentazione preesistente può essere riciclato per vari usi, quali ad esempio il reimpiego dello stesso negli strati non legati della sovrastruttura (previa caratterizzazione in laboratorio al fine

di garantirne la cessazione della qualifica di rifiuto, nelle more del Decreto del 28 Marzo 2018 n.69), ma all'interno delle miscele bituminose prodotte a caldo, secondo le comuni pratiche di utilizzo, se ne prevede non più del 20-30% su peso totale di miscela. Volendo aumentare tale percentuale si rende necessario l'utilizzo degli Additivi Rigeneranti (rejuvenators) che vengono impiegati, nella pratica comune, al fine di ripristinare le proprietà chimiche e reologiche del bitume invecchiato e riportarlo ad una condizione simile a quella del bitume originale in termini di prestazioni meccaniche e lavorabilità.

Per studiare in termini quantitativi tali effetti, è stato sviluppato, nell'ambito di ricerche precedenti svolte al Politecnico di Torino, uno strumento che prende il nome di "sistema modello". Il sistema modello cerca di svincolarsi dagli effetti, dovuti a molteplici fattori, che possono aversi all'interno di una miscela bituminosa completa (aggregato, filler, bitume, rap, additivo) e il suo utilizzo ha come obiettivo principale quello di indagare l'efficacia di diversi rejuvenator valutandone gli effetti diretti sul bitume. Si tratta di una particolare miscela, composta da aggregato quasi mono-granulare e bitume, per mezzo della quale il comportamento dei campioni testati in laboratorio, a parità di caratteristiche volumetriche, diventa maggiormente dipendente dal tipo di bitume (additivato eventualmente con un rejuvenator) e meno dallo scheletro litico.

Riportando lo studio su una scala più ampia, la presente tesi si pone come obiettivo quello di indagare gli effetti che un dosaggio di primo tentativo del rejuvenator valutato tramite il sistema modello può avere, invece, su una miscela completa con il 50% di RAP in peso e analizzare il comportamento meccanico di detta miscela al fine di valutarne un eventuale impiego ed, eventualmente, confrontarne i risultati con quelli dello studio sul sistema modello. In tal modo si mettono in evidenza e si possono indagare, altresì, le cause di eventuali differenze di comportamento. Ad esempio, alla scala della miscela completa, la volumetria o la struttura litica potrebbero avere un'influenza maggiore su alcuni parametri meccanici rispetto al contributo dato dal "ripristino" del bitume interessato dall'additivo ringiovanente; in tal caso, l'utilizzo di tali parametri non

avrebbe rilevanza nelle caratterizzazioni future di un rejuvenator effettuate tramite sistema modello.

Le prove di laboratorio sono state condotte, ai fini del confronto, su tre tipi di miscela per strato di collegamento:

- Miscela contenente solo materiali vergini;
- Miscela contenente materiali vergini e RAP al 50% in peso;
- Miscela contenente RAP al 50% additivata con rejuvenator;

In una fase preliminare di Mix Design, le miscele sono state progettate con l'obiettivo di ottenere stessa struttura litica, stesso contenuto di bitume totale e stessa volumetria ai fini del confronto. Segue una caratterizzazione meccanica sia in campo viscoelastico lineare per valutare le curve maestre del modulo dinamico, sia nei dintorni della rottura per valutare la resistenza a trazione indiretta secondo la configurazione "brasiliiana" a basse e medie temperature (4°C e 20°C) e la risposta a fatica per trazione diretta delle tre miscele.

STATO DELL'ARTE

I conglomerati bituminosi sono miscele di aggregati lapidei (normalmente ottenuti per frantumazione) con legante idrocarburato, filler ed eventuali additivi.

Gli aspetti principali legati alla composizione riguardano l'assortimento granulometrico degli aggregati e il dosaggio di legante.

In effetti, l'aggregato impiegato comprende più frazioni granulometriche al fine di costituire uno scheletro litico eterogeneo, ma il filler, pur costituendone una frazione specifica, viene considerato come una componente a sé stante poiché realizza un'intima unione con il legante per formare il cosiddetto mastice bituminoso che avvolge la fase lapidea e fornisce coesione all'intera miscela.

La quantità ottimale di bitume deve essere tale da ricoprire con una pellicola legante di spessore adeguato la superficie complessiva di tutte le particelle di aggregato. In particolare, il bitume inserito penetra in parte all'interno della porosità superficiale permeabile all'acqua (il cosiddetto bitume adsorbito), mentre la quota restante forma la sottile pellicola di ricoprimento menzionata in precedenza (bitume efficace).

La percentuale dei vuoti dopo costipamento del conglomerato è regolata dal volume intergranulare occupato dall'aria e, nei conglomerati chiusi, cioè quelli aventi una curva granulometrica ben assortita, corrisponde a pochi punti percentuali. Non è infatti possibile pensare di riempire i vuoti della miscela di aggregati con il solo bitume poiché esso, avendo una resistenza meccanica limitata, rappresenta un elemento di debolezza della miscela; inoltre, in una miscela completamente chiusa si avrebbero facilmente rifluimenti di legante in superficie a causa dei carichi da traffico. Per i motivi menzionati, la resistenza meccanica della fase legante è accettabilmente elevata proprio se il bitume

forma una pellicola sottile, dati i legami di natura molecolare che si instaurano tra legante e aggregato.

In definitiva, si può affermare che le caratteristiche volumetriche, ed in particolare la composizione della miscela di aggregati, la percentuale dei vuoti ed il quantitativo e la tipologia di bitume, siano tra le componenti che più influenzano le prestazioni meccaniche di un conglomerato tradizionale.

Nell'analisi volumetrica è possibile fare riferimento a diversi parametri, quali ad esempio la già menzionata percentuale dei vuoti e la VMA (Voids in Mineral Aggregate), che correlano le tre fasi componenti la miscela: solida (aggregati), semisolidi (bitume) e gassosa (aria). Detti parametri, prendendo in esame la quantità dei vuoti, sono esplicativi e ben sintetizzano le proprietà della miscela, in quanto tale quantità è legata alla granulometria dell'aggregato, alla percentuale di legante, all'efficacia del costipamento.

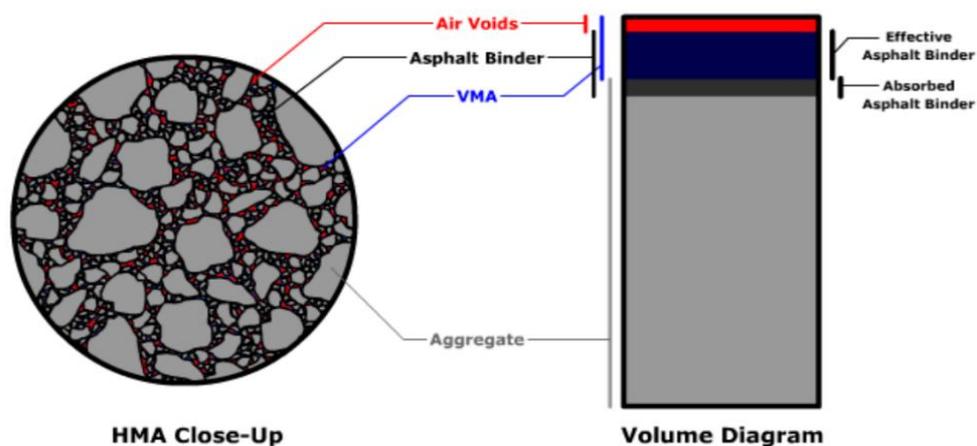


Figura 1 - Composizione volumetrica di una miscela di conglomerato bituminoso

Tuttavia, va precisato che la fase legante, essendo costituita da un materiale viscoelastico, presenta caratteristiche che variano in funzione delle attuali condizioni ambientali (umidità, temperatura) ed evolvono nel tempo a causa di fattori intrinseci ed esterni (ambiente, sollecitazioni) che ne determinano cambiamenti fisici e chimici. Di conseguenza diventa fondamentale anche considerare, ai fini dello studio prestazionale di una miscela di conglomerato, il contributo di tali variazioni.

UTILIZZO DEL RA

Come già accennato, la composizione della miscela può prevedere la presenza di fresato bituminoso proveniente dalla fresatura di pavimentazioni preesistenti e successiva frantumazione.

Le proprietà del RA sono largamente connesse alle proprietà dei materiali che lo costituiscono e al tipo di conglomerato bituminoso utilizzato nella vecchia pavimentazione: il numero di volte che la pavimentazione è stata rifatta, la quantità di rappezzati, di sigillature delle fessure e la possibile applicazione di precedenti mani d'attacco, sono tutti elementi che hanno influenza sulla composizione del RA. Da tali circostanze ne deriva una forte eterogeneità e si comprende come le sue proprietà dipendano fortemente da metodologia e luogo di approvvigionamento. Inoltre, con il passare del tempo, il conglomerato della pavimentazione subisce un progressivo deterioramento dei suoi elementi costituenti ed, in particolare, del legante bituminoso. Di conseguenza, il materiale fresato può essere riciclato all'interno di una nuova miscela solo previa attenta caratterizzazione eseguita tramite prove di laboratorio, atte a definirne le proprietà fisiche e chimiche, e tramite prove meccaniche, effettuate sia in laboratorio sia in situ.

Si possono individuare due distinte fasi attraverso le quali il bitume contenuto nel RAP subisce invecchiamento: a breve termine e a lungo termine. Durante la sua vita utile, a

lungo termine, il legante bituminoso subisce una variazione delle sue caratteristiche iniziali ed un sostanziale irrigidimento.

L'irrigidimento tempo-dipendente viene associato, secondo studi di letteratura [I. L. Al-Qadi, M. Elseifi, S. H. Carpenter, 2007], a svariati meccanismi: l'ossigeno contenuto nell'aria, veicolato attraverso un meccanismo di diffusione all'interno del legante, porta all'ossidazione dello stesso; l'evaporazione delle componenti più leggere del bitume, specialmente durante le fasi costruttive, porta ad un processo di volatilizzazione; a livello molecolare si svolgono reazioni chimiche di polimerizzazione; nel lungo periodo, all'interno del legante si avvia la formazione di una struttura a comportamento tissotropico; l'essudazione di minuscole quantità di frazione oleosa instaura un meccanismo di sineresi; l'eventuale presenza di aggregati non compatibili con alcune componenti del legante bituminoso può dare luogo alla separazione delle diverse frazioni che costituiscono la miscela. In figura sono mostrati i principali meccanismi di degrado (ossidazione, volatilizzazione ed interazione con gli aggregati) e gli agenti ambientali da cui sono provocati.

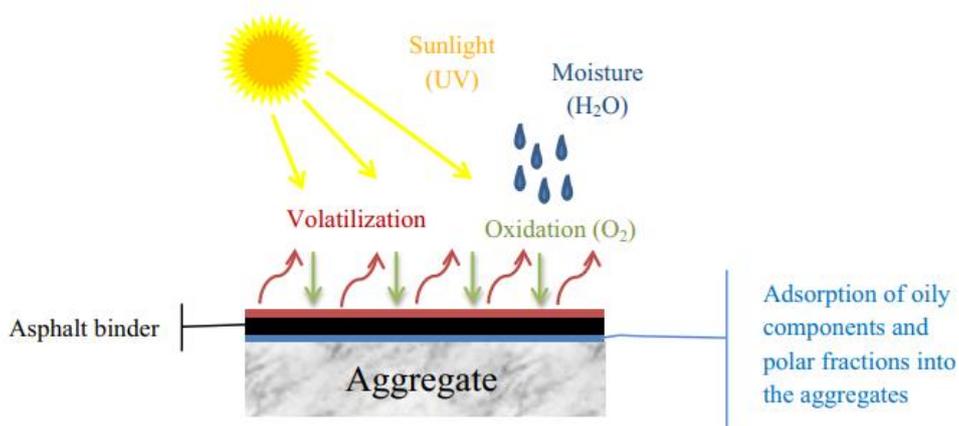


Figura 2 - Meccanismi di degrado degli strati superficiali della pavimentazione stradale

Parte delle situazioni di degrado succitate è favorita all'interfaccia tra la fase gassosa (vuoti d'aria) e la fase semisolida (bitume). Si comprende, quindi, quanto siano rilevanti gli aspetti relativi alla percentuale dei vuoti all'interno del conglomerato per quanto riguarda il suo stato di degrado e, di conseguenza, le sue caratteristiche prestazionali. Un RA ricavato da un conglomerato poroso o molto fessurato, si presenterà presumibilmente in uno stato più rigido di un RAP ricavato da una pavimentazione non porosa ed in buone condizioni; un aspetto di pari importanza è costituito dalle operazioni di stoccaggio del RA, data la possibile esposizione agli agenti atmosferici.

Al fine di comprenderne i meccanismi di degrado ed avere gli strumenti necessari per progettare una miscela che contenga del conglomerato riciclato (RA), quindi invecchiato, è necessario comprenderne la composizione. Il bitume è essenzialmente un sistema multi-fase costituito da idrocarburi dalla struttura complessa distinguibili in due categorie: asfalteni e malteni (resine e oli).

Se l'obiettivo di chi progetta la miscela è inserire un'elevata percentuale in peso di RA (50%) rispetto al peso di miscela finale, si rende necessario l'utilizzo di particolari agenti ringiovanenti (noti in letteratura come additivi rigeneranti o rejuvenators) che ripristinano le proprietà chimiche e reologiche del bitume invecchiato e lo riportano ad una condizione simile a quella del bitume originale in termini di prestazioni meccaniche e lavorabilità. Con alte percentuali di RA non è sufficiente, infatti, il contributo che dà l'aggiunta di bitume vergine, che tuttavia contribuisce, seppur con minor efficacia rispetto al rejuvenator, a "ringiovanire" il bitume invecchiato.

I rejuvenators contengono, essenzialmente, olii lubrificanti e diluenti, i quali, essendo affini ai malteni del bitume invecchiato, permettono il suddetto meccanismo di ripristino. Nello specifico, il conglomerato invecchiato è irrigidito poiché, tramite i meccanismi già detti (principalmente ossidazione), ha subito un disequilibrio nel rapporto tra la frazione maltenica e quella asfaltenica, sbilanciandosi a favore della

presenza di asfaltini, che conferiscono al materiale elevata rigidità, alta viscosità e bassa duttilità; l'agente chimico addizionato diffonde nel tempo (studi mostrano che ciò può avvenire sia a breve termine che a lungo termine) attraverso la matrice bituminosa del conglomerato da ripristinare riportando, auspicabilmente, il rapporto asfaltini/malteni allo stato iniziale.

Una delle problematiche cruciali riguardo all'utilizzo del fresato riciclato a caldo è conoscerne il grado di blending, cioè la quantità di bitume invecchiato che, a seguito del ripristino, torna a far parte della miscela in qualità di bitume efficace e si svincola dal "black rock" (bitume rigido+aggregato). Va da sé che il grado di blending influisce sia sulle prestazioni del conglomerato che sull'aspetto economico dell'intero processo.

Esistono studi contrastanti in letteratura riguardo alle assunzioni che andrebbero fatte riguardo al grado di blending, semplicemente perché tale parametro è influenzato da una moltitudine di fattori ed andrebbe valutato caso per caso. Quest'aspetto è importante perché se il progettista partisse da un'ipotesi di "total blending" quando in realtà il fresato si comporta come "black rock", la quantità di bitume totale nella miscela sarebbe sottostimata; ovviamente vale anche il caso opposto.

CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Il programma sperimentale del presente lavoro di tesi viene sviluppato analizzando in laboratorio miscele in conglomerato bituminoso progettate con materiali forniti da un'impresa locale. In questa fase preliminare, prima di procedere al mix design ed alla conseguente sperimentazione tramite analisi volumetriche e prove meccaniche della miscela nel suo stato compattato, si rende necessario caratterizzarne i singoli componenti al fine di conoscerne le caratteristiche fisiche, granulometriche e volumetriche. In tal modo si giunge ad un buon grado di conoscenza dei materiali oggetto di studio tramite cui è possibile sviluppare la fase di sperimentazione in maniera consapevole ed esaustiva.

Come si è già avuto modo di evincere, le miscele in conglomerato bituminoso analizzate sono costituite da aggregati, filler, bitume e, eventualmente, RA e rejuvenator. Le analisi di laboratorio effettuate riguardano essenzialmente aspetti composizionali e volumetrici.

AGGREGATI

Per quanto precedentemente detto, riguardo agli aggregati lapidei, la metodologia di qualificazione adottata è stata limitata a due aspetti fondamentali: l'assortimento granulometrico e la valutazione della massa volumica. Nel presente capitolo ci si riferisce anche al filler di aggiunta, seppur costituendo un elemento analizzato con strumentazioni diverse, ma con metodologie simili a quelle delle restanti classi granulometriche.

CAMPIONAMENTO E GRANULOMETRIA

Poiché gli aggregati sono formati da una molteplicità di elementi, vengono generalmente differenziati facendo riferimento a diverse classi dimensionali. Ogni classe è contraddistinta da un intervallo nominale compreso tra due dimensioni caratteristiche entro cui è contenuta la quasi totalità dei granuli (d/D), a meno di eventuali outliers. Poiché ogni classe dimensionale è contenitore di diverse frazioni granulometriche, diventa di fondamentale importanza la valutazione minuziosa dell'assortimento granulometrico facendo uso di alcuni concetti di statistica, aspetto che permette di controllare le proprietà desiderate in fase di progettazione della miscela.

Sia per il prelievo in stabilimento che per la campionatura in laboratorio, è necessario ottenere un campione casuale semplice di materiale per poterne generalizzare le caratteristiche all'intera fornitura disponibile. Si è proceduto, dunque, alla campionatura di una parte statisticamente significativa del materiale disponibile calcolando, in prima istanza, il quantitativo minimo in peso del campione tramite la seguente formula, riportata nel BS EN 933-1:2012, dove M è la massa minima (in Kg) e D la dimensione massima dell'aggregato (in mm):

$$M = \left(\frac{D}{10}\right)^2$$

La quantità di aggregato, essendo un materiale in forma "sciolta", viene campionata tramite due diversi approcci: tramite il quartatore di Jones oppure ricorrendo alla tecnica manuale.

Il quartatore di Jones viene utilizzato per suddividere grandi quantità di materiale essendo, essenzialmente, un macchinario che assembla un secchio caricatore e due scomparti raccoglitori, che hanno la funzione di collezionare gli aggregati divisi in due parti dopo il passaggio attraverso una doppia griglia come illustrato in figura.



Figura 3 - Quartatore di Jones

Si ricorre alla tecnica manuale, invece, nel momento in cui si vuole suddividere un campione di dimensioni limitate, eventualmente già suddiviso con il quartatore, per estrarne una quantità voluta con maggiore precisione.



Figura 4 - Quartatura con tecnica manuale

Le metodologie di quartatura adottate fanno riferimento al BS EN 932-2:1999.

Nell'ambito del presente studio, si è avuta a disposizione una fornitura di aggregati appartenenti alle seguenti classi dimensionali:

- 0/8;
- 3/8;
- 8/18;
- 18/30;

La classe dimensionale 18/30 è stata scartata poiché non funzionale al progetto della miscela in questione. Dopo aver estratto i campioni rappresentativi da ogni classe dimensionale, si procede, quindi, alla determinazione dell'assortimento granulometrico di ognuna di esse.

I campioni analizzati vengono preventivamente lavati, asciugati e pesati (pre- e post-lavaggio) in forno alla temperatura di 105°C fino al raggiungimento di una massa costante, in modo tale da escluderne il passante al setaccio 0.063 mm (filler), secondo quanto riportato nella BS EN 933-1:2012 ed avvalendosi dell'utilizzo di due setacci della serie 2 mm e 0.063 mm durante il lavaggio. Il filler, di fatto, viene eliminato dall'aggregato per procedere alla setacciatura in maniera più agevole e scrupolosa; viene quantificato per differenza tra i pesi pre- e post- lavaggio.

Gli aggregati delle classi dimensionali 0/8, 3/8, 8/18 sono stati fatti passare attraverso una pila di setacci a maglie quadrate, delle dimensioni indicate nella norma BS EN 13043:2013:

- Set 2: 31.5 mm, 20 mm, 16.3 mm, 14 mm, 12.5 mm, 10 mm, 8 mm, 6.3 mm, 4 mm, 2 mm;

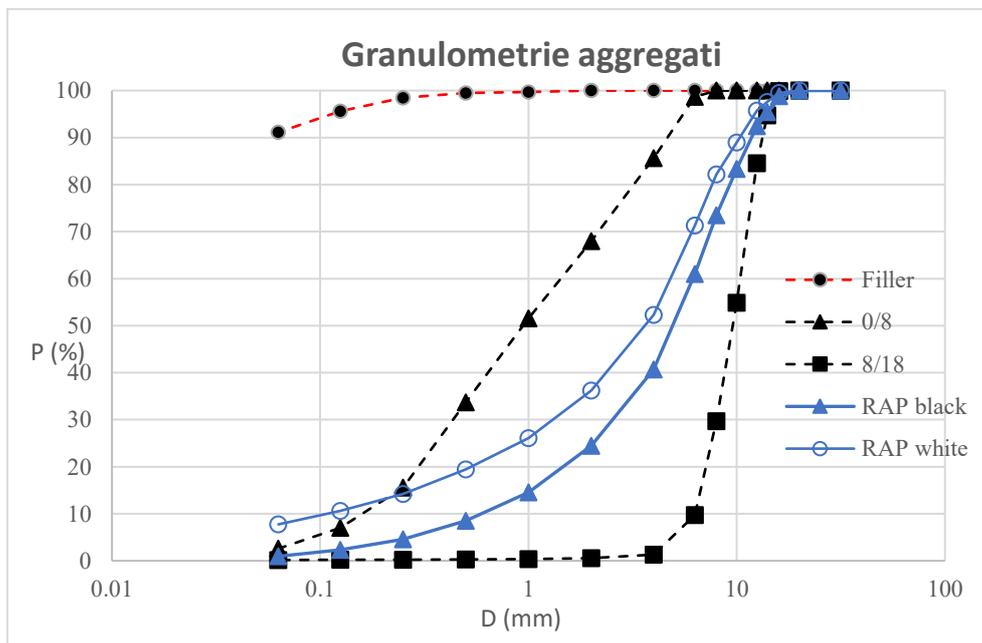
con l'aggiunta dei setacci con apertura:

- 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm, 0.063 mm

disposti in maniera decrescente verso il basso, setacciati per mezzo di un setacciatore vibrante automatico. Passati i 10 minuti di setacciatura automatica, si procede alla setacciatura manuale secondo quanto indicato nella BS EN 933-1.

Per quanto riguarda il filler di aggiunta utilizzato nel mix design, si è optato per l'utilizzo di strumenti più adatti alle dimensioni dei suoi granuli, facendo uso dei setacci delle serie 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm, 0.063 mm, con l'ausilio di un pestello. Si tratta di un carbonato di calcio (CaCO_3) di alta qualità e ne sono stati analizzati campioni del peso di 50 g.

Di seguito si riportano i dati dell'analisi granulometrica effettuata in laboratorio.



	Filler	0/8	8/18	RAP black	RAP white
D	P	P	P	P	P
(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
31.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
16	100.0	100.0	99.9	98.8	99.5
14	100.0	100.0	94.7	95.4	97.6
12.5	100.0	100.0	84.5	92.4	95.7
10	100.0	100.0	54.9	83.3	88.9
8	100.0	100.0	29.7	73.5	82.2
6.3	100.0	98.7	9.7	61.0	71.3
4	100.0	85.6	1.3	40.7	52.3
2	100.0	68.0	0.6	24.5	36.2
1	99.7	51.5	0.4	14.5	26.1
0.5	99.5	33.7	0.3	8.5	19.4
0.25	98.5	15.6	0.2	4.6	14.2
0.125	95.6	7.0	0.2	2.3	10.6
0.063	91.1	2.6	0.2	1.0	7.7

Tabella 1 - Granulometrie aggregati

MASSA VOLUMICA APPARENTE

La massa volumica apparente è definita come il rapporto tra la massa del campione di aggregato essiccato e il suo volume occupato in acqua, compreso ogni vuoto interno non accessibile ma esclusi i pori accessibili all'acqua. Viene calcolata in relazione ad una classe granulometrica di aggregato. In questo capitolo si fa riferimento alla massa volumica apparente valutata sugli aggregati appartenenti alle classi già menzionate: 0/8, 3/8, 8/18. L'analisi sugli aggregati è realizzata in conformità con la norma BS EN 1097-6:2013 (All. A.4: metodo del picnometro).

La normativa indica, sulla base della dimensione massima dell'aggregato, una massa minima del campione da sottoporre a prova; questa viene estratta dalla fornitura di riferimento tramite la procedura di campionamento descritta nel sottocapitolo precedente.

Seguendo la metodologia da normativa, ci si avvale dell'utilizzo di picnometri di vetro borosilicato all'interno dei quali inserire il campione, di acqua distillata, di una pompa di aspirazione dell'aria atta a disaerare il materiale contenuto nei picnometri e di strumentazione accessori (termometro, pipetta, sessola).



Figura 5 - Pompa di aspirazione; picnometri

L'analisi viene condotta previa calibrazione (calcolo del volume) dei picnometri. Dopodiché si valuta la massa volumica apparente tramite la seguente formula:

$$\rho_a = \frac{(M_2 - M_1)}{V - (M_3 - M_2) / \rho_w}$$

dove:

M_1 è la massa del picnometro e del tappo (g);

M_2 è la massa del picnometro, tappo e materiale (g);

M_3 è la massa del picnometro, tappo, materiale, acqua disaerata (g);

V è il volume del picnometro (ml);

ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova (Mg/m^3).

Densità aggregati		
	ρ_a	Dev. St.
	(g/cm^3)	(g/cm^3)
0/8	2.753	0.006
8/18	2.75	0.006
Filler	2.633	0.183
RAP white	2.762	0.008

Tabella 2 - Massa volumica apparente degli aggregati

La precisione della metodologia di prova è di $0.01 Mg/m^3$.

Per quanto riguarda il filler di aggiunta ci si riferisce alla norma BS EN 1097-7:2008 che calcola la densità nello stesso modo, ma suggerisce di utilizzare una diversa strumentazione, simile ma di dimensioni più piccole: picnometri dalla capienza di 50 ml e relativi tappi con apertura capillare, da rabboccare tramite l'utilizzo di siringhe.

BITUME

Il bitume utilizzato nel presente studio è un bitume avente classe di penetrazione 50/70, vale a dire che l'affondamento verticale ad una temperatura di $25^\circ C$ subito dall'ago metallico del penetrometro descritto nella norma UNI EN 1426, sotto il peso di 100 g e nell'arco di 5 secondi, si attesta nell'intervallo 50-70 dmm.



Figura 6 - Latta di bitume 50/70

Il bitume 50-70 presenta buone caratteristiche di resistenza all'invecchiamento, di elastoplasticità e di comportamento alle basse temperature. L'ottimale viscosità nel campo delle tradizionali temperature di confezionamento e posa in opera dei conglomerati, consente un'agevole operatività, anche in condizioni di lavorazione critiche. Tale bitume trova largo impiego nell'esecuzione dei conglomerati per pavimentazioni flessibili in campo stradale.

ADDITIVO

L'additivo utilizzato, essendo un prodotto commerciale, viene denominato "P" nell'ambito della ricerca in cui si inquadra il presente lavoro di tesi. Si tratta di un additivo ringiovanente (rejuvenator) non tossico ed a base vegetale le cui caratteristiche sono elencate in tabella:

Densità	Viscosità a 20°C	Flash Point
(g/cm ³)	(mPa·s)	(°C)
0.98	40	>150

Tabella 3 - Caratteristiche additivo

Gli aspetti di maggior interesse operativo relativi al rejuvenator riguardano la modalità di applicazione sul conglomerato bituminoso ed il suo dosaggio.

Come già menzionato, il rejuvenator permette di rigenerare le caratteristiche del bitume invecchiato contenuto nel conglomerato da riciclare ristabilendone il rapporto asfaltini/malteni originale; il suo dosaggio ottimale dipende dalla percentuale di conglomerato riciclato e dalle caratteristiche del bitume in esso contenuto. Con riferimento alla scala di studio di una miscela completa, lo studio del dosaggio ottimale richiede particolare cautela e tale dosaggio dev'essere necessariamente tarato nei riguardi della particolare tipologia di fresato utilizzata, data la variabilità intrinseca di tale materiale in funzione del luogo di provenienza.

Per quanto riguarda la modalità di applicazione, si è scelto di spruzzarlo a freddo sul conglomerato caldo in fase di miscelazione (160°C), modalità tradizionalmente ritenuta accettabile affinché si abbia una corretta distribuzione dello stesso all'interno della miscela contenente fresato da riciclare.

FRESATO

Per quanto detto nel in precedenza, il fresato è un materiale estremamente eterogeneo, caratteristica, questa, dovuta alla natura del materiale stesso. Tuttavia, può essere caratterizzato sfruttando le stesse modalità utilizzate per caratterizzare l'aggregato semplice; l'aspetto che li contraddistingue è la presenza, nel RAP, di bitume invecchiato aderente alla superficie degli aggregati, che alla temperatura ambiente, gli conferisce un aspetto simile ad una terra. Tale bitume, se riscaldato, si rimescola nella miscela e, in presenza di rejuvenator, potrebbe subire modifiche chimiche tali da vedere ripristinate alcune sue proprietà fisiche e meccaniche di interesse per il campo di applicazione delle pavimentazioni stradali.

Il meccanismo secondo cui il bitume, vedendo abbassarsi la sua viscosità tramite riscaldamento, diviene parte della miscela in qualità di bitume efficace (seppur irrigidito, in assenza di additivi) prende il nome di “blending”. Aspetto fondamentale nell’utilizzo del RA è proprio il grado di partecipazione (blending) del bitume invecchiato nella miscela.

Sotto l’ipotesi di “total blending” accettata nelle analisi del presente studio, diventa necessario, quindi, caratterizzare tale materiale nelle sue due versioni: black rock e aggregato-RA.

Nella configurazione di black rock si è in presenza di singoli elementi di aggregato circondati da bitume, invecchiato ed irrigidito, in compresenza di cluster di elementi delle frazioni più fini adesi ad altro bitume irrigidito; il comportamento volumetrico è quello di un aggregato vero e proprio.

Nella configurazione di aggregato-RA si è in presenza di aggregato lapideo in assenza di bitume.

Alla luce delle precedenti considerazioni è evidente che gli aspetti più importanti circa la caratterizzazione del RA, al fine di comprenderne le proprietà fisiche utili al progetto di miscela, siano l’analisi granulometrica, la massima massa volumica teorica ed il contenuto di bitume nel fresato. I primi due aspetti sono stati descritti in precedenza con riferimento all’aggregato vergine (bisogna chiarire che il black rock non viene lavato per eliminarne la frazione passante allo staccio 0.063); il contenuto di bitume, invece, viene determinato.

GRANULOMETRIA

L’analisi granulometrica viene effettuata con riferimento al black rock ed all’aggregato-RA seguendo le stesse modalità descritte relativamente agli aggregati.

MASSA VOLUMICA APPARENTE

La massa volumica apparente viene determinata con le stesse modalità descritte nel sottocapitolo relativo agli aggregati.

CONTENUTO DI BITUME TRAMITE IGNIZIONE

La procedura per la determinazione del contenuto di bitume si avvale di un macchinario, denominato “Carbolite”, ed è stata effettuata conformemente alla norma BS EN 12697-39:2020. La Carbolite è sostanzialmente un forno che, alla temperatura di 540°C, brucia il bitume contenuto nel materiale disposto in un cestello metallico a due livelli; è quindi una prova di ignizione.

Il materiale, indubbiamente, va inserito asciutto all’interno del forno che, essendo provvisto di bilancia interna, avvia l’ignizione e procede fintanto che non vengano apprezzate significative variazioni di peso.



Figura 7 - Carbolite

La percentuale di bitume viene calcolata tramite la seguente formula:

$$B_{agg-RA} = \frac{(W_s - W_a)}{W_a} \times 100$$

dove:

W_s è il peso del RA pre-ignizione;

W_a è il peso dell'aggregato-RA (RA post-ignizione);

$B_{agg-RAP}$ è la percentuale di bitume su peso di aggregato RA.

	Bitume contenuto nel rap		
	su_aggRAP	su_RAP	su_CB
%B	5	4.76	2.38
Dev. st.	0.25		

Tabella 4 - Percentuale di bitume contenuto nel rap

INDAGINE SPERIMENTALE

La caratterizzazione dei materiali effettuata nei capitoli precedenti permette di procedere alla fase successiva del lavoro di ricerca: la sperimentazione. Il progetto di miscela, la sua realizzazione ed i test volumetrici e meccanici sono tutti aspetti che vengono affrontati in dettaglio nel presente capitolo con il proposito di arrivare alla dissertazione conclusiva riguardante l'analisi dei dati ottenuti.

Una miscela in conglomerato bituminoso, per strato di collegamento, contenente 50% di RA in peso, oltrepassa i limiti convenzionali di quantitativo di fresato riciclato che in genere si attesta attorno al 20-30%. Si vogliono, quindi, indagare gli effetti che il rejuvenator studiato con il sistema modello può avere sulla miscela completa con il 50% di RA in peso e analizzare il comportamento di detta miscela al fine di confrontarne i risultati.

La sperimentazione prevede una prima fase di mix design in cui si è mirato ad ottenere una composizione granulometrica dello scheletro litico ed una percentuale ottimale di bitume tali da permettere alla miscela di avere una percentuale dei vuoti target nel suo stato compattato; per completezza sono stati analizzati anche i valori di resistenza a trazione indiretta a 25°C, in conformità alle indicazioni del metodo volumetrico di mix design da capitolato CIRS.

In una seconda fase della sperimentazione, sono state prodotte e testate tre tipologie di miscela per strato di collegamento:

- MIX-V;
- MIX-RA;
- MIX-RE;

dove:

MIX-V è una miscela contenente solo materiali vergini;

MIX-RA è una miscela contenente materiali vergini e RA al 50% in peso;

MIX-RE è una miscela contenente RA al 50% additivata con rejuvenator;

Prima di entrare nel dettaglio delle prove effettuate è necessario presentare le metodologie adottate per la creazione e caratterizzazione del conglomerato bituminoso nella sua forma sciolta e nella sua forma compattata, in modo tale da fornire al lettore gli strumenti necessari per valutare in maniera consapevole le scelte progettuali effettuate sia in fase di mix design che in fase di produzione delle diverse tipologie di provini.

In un secondo momento, vengono descritte altresì le metodologie per la determinazione, sui provini compattati, delle caratteristiche meccaniche valutate sia in campo viscoelastico lineare, in termini di modulo dinamico, sia nei dintorni della rottura, in termini di ITS (Indirect Tensile Strength) e di resistenza a fatica. Le prove di modulo dinamico sono state realizzate a diverse temperature (4°C, 20°C, 40°C) ed a diverse frequenze in modo tale da ottenere i dati necessari per la computazione delle curve maestre; le prove di trazione indiretta sono state effettuate alle basse e medie temperature (4°C, 20°C) in modo tale da avere a disposizione i dati necessari per il confronto con i dati ottenuti sul sistema modello su cui è stato applicato lo stesso rejuvenator; le prove di fatica, infine, sono state realizzate tramite prove di trazione monoassiale diretta ciclica, condotte a controllo di deformazione.

Nella seguente tabella è elencata la totalità dei provini prodotti nella fase di mix design:

			ID	n.giri
Mix Design	MIX-V	%B = 4.5	1	100
			2	
			3	180
			4	
		%B = 4.7	1	100
			2	
			3	180
			4	
		%B = 5.0	1	100
			2	
			3	180
			4	
	MIX-RA	%B = 4.7	1	100
			2	
			3	180
			4	
MIX-RE	%B = 4.7	1	100	
		2		
		3	180	
		4		

Tabella 5 - Provini prodotti nella fase di Mix Design

Nella tabella a pagina seguente è indicata la totalità dei provini prodotti nella seconda fase della sperimentazione, sulla base miscela scelta in fase di mix design.

Produzione delle miscele	MIX-V		
	MIX-RA		
	MIX-RE		
Confezionamento dei provini	PROVINI PER MODULO DINAMICO E FATICA	MIX-V	V1
			V2
			V3
			V4
			V5
			V6
		MIX-RA	RA1
			RA2
			RA3
			RA4
			RA5
			RA6
		MIX-RE	RE1
			RE2
			RE3
			RE4
			RE5
			RE6
	PROVINI PER ITS A 4°C	MIX-V	1v
			2v
			3v
		MIX-RA	1ra
			2ra
			3ra
MIX-RE		1re	
		2re	
		3re	
PROVINI PER ITS A 20°C	MIX-V	4v	
		5v	
		6v	
	MIX-RA	4ra	
		5ra	
		6ra	
	MIX-RE	4re	
		5re	
		6re	

Tabella 6 - Provini prodotti per test meccanici

A questi bisogna aggiungere i tre provini prodotti per la calibrazione della percentuale dei vuoti post-carotaggio, per quanto riguarda i provini per modulo dinamico e fatica; questi sono stati denominati:

- V dummy
- RA dummy
- RE dummy

I provini per il mix design e quelli da testare a trazione indiretta (ITS) vengono prodotti in forma cilindrica con le seguenti dimensioni caratteristiche:

	Altezza	Diametro
	(mm)	(mm)
PROVINI PER MIX DESIGN E ITS	70	100

Tabella 7 - Dimensioni geometriche provini per mix design e ITS

I provini su cui valutare il modulo dinamico e la resistenza a fatica, invece, vengono realizzati con le seguenti dimensioni iniziali:

	Altezza	Diametro
	(mm)	(mm)
PROVINI PER MD E FATICA (pre-sagomatura)	170	150

Tabella 8 - Dimensioni geometriche provini pre-sagomati

A seguito di opportuna sagomatura tramite carotaggio e taglio, assumono le dimensioni qui sotto indicate al fine di poter essere installati nelle apposite apparecchiature di prova:

	Altezza	Diametro
	(mm)	(mm)
PROVINI PER MD E FATICA (sagomati)	130	100

MIX DESIGN – conglomerato bituminoso per strato di collegamento

In seguito alla qualificazione dei materiali necessari alla composizione del conglomerato, il progetto della miscela bituminosa, secondo il metodo volumetrico indicato nel capitolato CIRS, si articola essenzialmente in due fasi:

- Definizione della miscela di aggregati
- Determinazione del dosaggio di legante

Come noto, la miscela degli aggregati deve soddisfare dei prefissati limiti granulometrici stabiliti in relazione al tipo di materiale e allo strato della pavimentazione. Per il caso in esame, viene preso in considerazione il fuso granulometrico dello stabilimento fornitore dei materiali e si conduce uno studio di miscela relativo ad uno strato di collegamento (binder).

La composizione dello scheletro litico ricercata, a partire dalle classi dimensionali disponibili, viene ottenuta dalla combinazione di tali classi. E' necessario, quindi, determinare i rapporti ponderali di ciascuna classe dimensionale. Il problema consiste nella risoluzione di un sistema di $n+1$ equazioni, dove n è pari al numero dei setacci della serie adottata, in m incognite, dove m rappresenta il numero delle classi disponibili.

L'equazione ai passanti relativa al setaccio i-esimo è la seguente:

$$P_{1,i} \cdot \alpha_1 + P_{2,i} \cdot \alpha_2 + \dots + P_{j,i} \cdot \alpha_j + \dots + P_{m,i} \cdot \alpha_m = P_i$$

dove

$P_{j,i}$ è il passante al vaglio i-esimo della classe j-esima;

α_j è la percentuale in peso rispetto al totale della classe stessa;

P_i è il passante corrispondente alla curva obiettivo ricercata.

I vincoli progettuali sono i seguenti:

$$\sum_{j=1}^m \alpha_j = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_j + \dots + \alpha_m = 1$$

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m \geq 0$$

Il sistema risulta algebricamente ridondante e, di conseguenza, la soluzione che meglio approssima la curva obiettivo viene trovata con il metodo dei minimi quadrati, minimizzando gli scarti tra i valori obiettivo relativi a ciascun setaccio e i valori dati dalla combinazione delle classi. La soluzione viene trovata sfruttando lo strumento "Risolutore" di Microsoft Excel.

Per quanto riguarda la percentuale ottimale di bitume, essa varia in base alla tipologia di miscela tra le tre analizzate e viene valutata sulla base delle caratteristiche volumetriche ottenute secondo le procedure indicate nei capitoli precedenti. In conformità al capitolato CIRS, tale valore deve comunque attestarsi all'interno di uno specifico intervallo per ciò che concerne gli strati di collegamento, come mostrato in tabella:

INTERVALLO DI PROGETTO – % DI BITUME (per strato di collegamento)	4.5 – 5.5
--	-----------

Tabella 9 - Limiti CIRS per il contenuto di bitume

Il metodo volumetrico per il mix design prevede di valutare la bontà della ricetta progettata tramite il raggiungimento di determinati requisiti volumetrici e, in secondo luogo, la valutazione della resistenza a trazione indiretta a 25°C. La seguente tabella riassume i parametri di controllo per il mix design volumetrico di uno strato di collegamento ed è estratta dal Capitolato CIRS (Art. 4):

Vuoti a 100 rotazioni (%)	3-5
Vuoti a 180 rotazioni (%)	>2
Resistenza a trazione indiretta a 25°C (N/mm ²) (su provini confezionati a 100 rotazioni della pressa giratoria)	N.D.

Tabella 10 - Limiti CIRS per il metodo volumetrico

Alla luce di quanto detto, prima di procedere alla discussione riguardo le scelte progettuali effettuate nella fase di mix design si rende necessaria una dissertazione sulle metodologie adottate per la produzione delle stesse e per la valutazione delle caratteristiche volumetriche dei provini.

PRODUZIONE DELLE MISCELE

Nota la ricetta della miscela, è possibile procedere alla manifattura delle miscele in conglomerato bituminoso. La procedura viene eseguita in laboratorio in conformità alla norma BS EN 12697-35:2016.

I parametri fondamentali per la preparazione della miscela di conglomerato sono la temperatura di miscelazione e il tempo di miscelazione. Tali parametri sono funzione della tipologia di bitume utilizzata, della eventuale presenza di RA, del metodo di miscelazione adottato. Le miscele studiate sono state realizzate con la seguente modalità:

- Temperatura di miscelazione: 160°C
- Tempo di miscelazione:

	Miscelazione automatica	Miscelazione manuale
Senza RAP	3 min	5 min
Con RAP	5 min	Secondo necessità

Tabella 11 - Tempi di miscelazione per conglomerato bituminoso

Viene di seguito descritta la procedura manuale per la realizzazione di una miscela; la procedura con miscelatore automatico segue gli stessi passaggi ma permette la produzione di un maggior quantitativo di materiale.



Figura 8 - Miscelatore automatico per conglomerato bituminoso

Gli aggregati, il filler, ed eventualmente il RA, vengono posti in forno statico a 160°C per il tempo necessario affinché giungano a temperatura; il bitume necessita di un tempo minore rispetto agli aggregati e viene infornato con adeguato ritardo. Nel contempo, vengono riscaldati gli strumenti che entreranno a contatto con il materiale, vale a dire la coppa di miscelazione e le sessole per il prelievo e la miscelazione manuale. La temperatura di miscelazione deve essere mantenuta per un tempo limitato in modo tale da evitare deterioramento dell'aggregato e, soprattutto, del bitume. Quando tutta la strumentazione e le materie prima raggiungono la temperatura corretta, monitorata tramite appositi termoscaner laser, si procede alla miscelazione. L'aggiunta dei materiali viene eseguita inserendo dapprima tutto l'aggregato (ed eventualmente il RAP) ed, in seguito, il filler ed il bitume in più iterazioni in modo tale da evitare l'aggregazione del filler in cluster di mastice bituminoso e rendere il prodotto finale il più omogeneo possibile. Al termine della procedura, viene raccolto il conglomerato ed etichettato in base alla destinazione di utilizzo.

Per quanto riguarda le miscele con rejuvenator la procedura rimane simile, con la differenza che il rejuvenator, opportunamente dosato, viene applicato a freddo sulla miscela calda all'interno della coppa di miscelazione.

MASSIMA MASSA VOLUMICA TEORICA

La massima massa volumica teorica, o MMVT (anche detta TMD, Theoretical Maximum Density), rappresenta il valore limite della massa volumica di un materiale in condizione di vuoti nulli ed è un valore intrinseco del materiale nel suo stato sciolto (non compattato).

Ai fini della caratterizzazione del conglomerato bituminoso ottenuto dopo la miscelazione è importante valutarne la massima massa volumica teorica tramite una procedura, analoga a quella illustrata nei capitoli precedenti per il calcolo della massa volumica apparente dell'aggregato, che si avvale del metodo picnometrico. Si fa riferimento, in questo caso, alla normativa BS EN 12697-5 relativa alle miscele bituminose.

Per il calcolo della MMVT con il metodo volumetrico si fa uso della seguente equazione:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^3 \cdot V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}$$

dove:

ρ_{mv} è la MMVT del conglomerato bituminoso (Kg/m³)

m_1 è la massa del picnometro con il tappo

m_2 è la massa del picnometro con il tappo ed il materiale

m_3 è la massa del picnometro con il tappo, il materiale e l'acqua

V_p è il volume del picnometro, calibrato in precedenza

ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

La valutazione della MMVT, oltre che aggiungere un tassello alla conoscenza del materiale trattato, si rende necessaria ai fini del calcolo della massa da inserire nella fustella durante la procedura di compattazione. Essendo a conoscenza della MMVT, infatti, noto il diametro interno della fustella (equivale al diametro del provino), si può determinare la massa da inserire nella fustella tramite la seguente formula:

$$M = 10^{-3} \pi \frac{D^2}{4} \rho_M h_{min}$$

dove

M è la massa da introdurre nella fustella (g);

D è il diametro interno della fustella (mm);

h_{min} è l'altezza target del provino compattato (mm);

ρ_M è la massima massa volumica teorica del conglomerato (mm).

CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI

Come menzionato in precedenza, il conglomerato bituminoso all'atto della messa in opera equivale ad un sistema fisico il cui modello è sintetizzato in Figura 1. Agli elementi aggiunti all'atto della miscelazione ve ne si aggiunge un ulteriore, inglobato nel provino all'atto della compattazione: l'aria contenuta nei vuoti.

Per una miscela di tipo tradizionale è possibile individuare un intervallo di vuoti ottimale all'interno del quale si è in presenza di una risposta meccanica che concilia due comportamenti differenti: un eccessivo incremento della porosità renderebbe la miscela

meno durevole rispetto all'azione di agenti esterni qual è l'acqua e ne diminuirebbe la resistenza a fatica, mentre nel caso di bassa percentuale dei vuoti si determinerebbe un accumulo di deformazioni plastiche con peggioramento della resistenza nei riguardi dell'ormaiamento. Ne consegue che la percentuale dei vuoti è un parametro da valutare e calibrare con estrema attenzione.

La metodologia di compattazione utilizzata per la manifattura dei provini si avvale della pressa a taglio giratorio in conformità alla norma BS EN 12697-31:2019. La pressa a taglio giratorio, nella configurazione utilizzata, consiste in un compattatore elettromeccanico che applica una pressione normale, pari a 600 kPa, su una fustella con un diametro interno prefissato (in base alla dimensione voluta del provino compattato) alloggiata nel macchinario in presenza di appositi cuscinetti-guida ed inclinata di 1.25° rispetto all'asse verticale del pistone; in tal modo, la fustella inclinata, ruotando attorno all'asse verticale grazie ad un motore elettrico, subisce contemporaneamente una sollecitazione di taglio che permette di simulare l'azione di impasto tipica del rullo in cantiere.

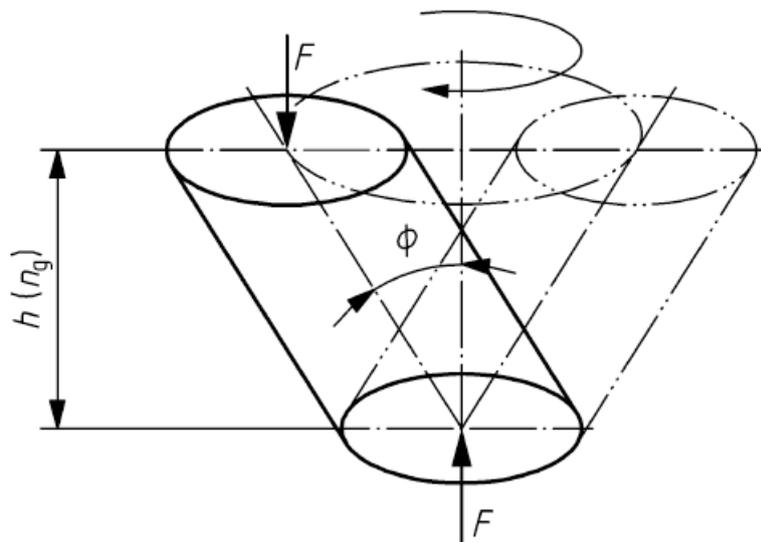


Figura 9 - Schema di provino inserito in pressa giratoria

dove

F è la forza applicata;

$h(n_g)$ è l'altezza del campione in funzione del numero di giri;

ϕ è l'angolo di inclinazione della fustella rispetto alla verticale.

Al termine della compattazione è possibile estrarre il campione dalla fustella e assegnargli un nome identificativo.

Un altro vantaggio dell'utilizzo della pressa a taglio giratorio è la possibilità di interfacciare tale macchinario con un computer in modo tale da registrare i dati di compattazione (altezza in funzione del numero di giri).

Sfruttando i dati di compattazione, si può eseguire un'analisi sulla lavorabilità della miscela.



Figura 10 - Sportello e schermo della pressa a taglio giratorio

LAVORABILITA'

La lavorabilità è l'attitudine di un conglomerato bituminoso a raggiungere un determinato livello di addensamento. Riprendendo i dati ottenuti dalla pressa a taglio giratorio è possibile costruire, nel piano semi-logaritmico "logN_x-C_x", una retta di lavorabilità della forma:

$$C_x = C_1 + k \cdot \log N_x$$

dove

C_x è la percentuale di compattazione al giro x-esimo (%);

C₁ è il valore di auto-addensamento della miscela;

k è la lavorabilità della miscela;

N_x è il numero dei giri effettuati al giro x-esimo.

L'auto-addensamento e la lavorabilità sono due costanti caratteristiche della miscela:

- L'auto-addensamento è legato alla struttura litica e rappresenta l'assestamento che presenta il provino dopo il primo giro; a miscele con struttura litica di buona qualità corrispondono valori di C₁ bassi. Sul piano semi-logaritmico si identifica con l'intercetta della retta di lavorabilità.
- La lavorabilità k è il parametro che regola la pendenza della retta ed equivale ad un gradiente di addensamento, al variare del numero dei giri; esso aumenta se la miscela tende più velocemente a raggiungere un determinato livello di addensamento.

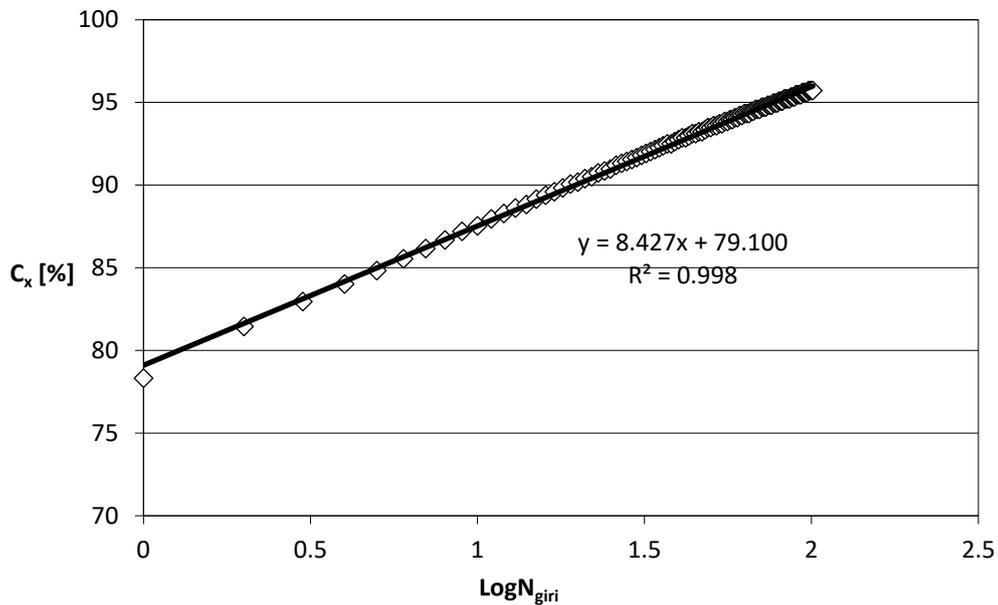


Figura 11 - Esempio retta di lavorabilità

Per ottenere la retta di lavorabilità definitiva bisogna moltiplicare i valori di compattazione per un fattore correttivo che tenga conto della situazione reale (misurata) dei vuoti residui, secondo i seguenti passaggi:

- Tramite il valore di altezza restituito in output dalla pressa a taglio giratorio si calcola il volume geometrico V_x ;
- Si calcola la percentuale di compattazione geometrica, noti la massa effettiva del campione, il volume geometrico e la MMVT del conglomerato;
- Si calcola il fattore di correzione in corrispondenza del numero massimo di giri tramite la seguente formula:

$$C = \frac{MV_{reale}@N_{max}}{MV_{geom}@N_{max}}$$

- Si moltiplica il fattore di correzione per la percentuale di compattazione geometrica per ottenere la percentuale di compattazione corretta

MASSA VOLUMICA E CONTENUTO DEI VUOTI RESIDUI

Il calcolo della massa volumica è essenziale ai fini del mix design poiché serve per stabilire la percentuale dei vuoti utile alla scelta del contenuto di bitume ottimale, nell'ambito del metodo volumetrico come da capitolato CIRS; al contempo, la percentuale dei vuoti è un parametro rilevante ai fini della caratterizzazione dei provini stessi quando se ne vuole analizzare il comportamento meccanico. Si cerca di ottenere provini aventi tutti la stessa volumetria in modo tale da poterli confrontare in termini di caratteristiche meccaniche.

La massa volumica viene valutata in conformità alle indicazioni della normativa BS EN 12697-6:2020.

Preliminarmente all'esecuzione della procedura va caratterizzato geometricamente il campione misurandone, per mezzo di un calibro ventesimale a corsoio, diametro e altezza in almeno quattro punti.

La procedura per la valutazione della massa volumica consiste nella determinazione di massa e volume del provino. Per determinare la massa si effettua una pesata in aria del campione asciutto. Per determinare il volume ci si avvale del principio di Archimede; il provino, infatti, possiede una superficie irregolare proprio a causa della sua porosità superficiale e non è possibile approssimarne il volume esatto a quello geometrico. Il provino viene immerso in acqua e lasciato a saturare per almeno 30 min (e comunque per meno di 3h) in una vasca riempita di acqua distillata; dopodiché si effettua una pesata in acqua. La temperatura del bagno d'acqua distillata dev'essere misurata per mezzo di un termometro di precisione al fine del calcolo della densità dell'acqua a mezzo della seguente formula:

$$\rho_w = 1.00025205 + \left(\frac{7.59 \times t - 5.32 \times t^2}{10^6} \right)$$

dove

t è la temperatura dell'acqua (°C);

ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova (Mg/m³).

La precisione della densità dell'acqua dev'essere di 0.0001 Mg/m³; la precisione delle misure di peso deve essere di 0.1 g.

Dopo aver pesato il provino in aria ed in acqua, occorre effettuare la pesata a superficie satura; detta pesata consiste nell'estrarre il provino dal bagno d'acqua e nell'asciugarlo con un panno in camoscio preventivamente inumidito fintanto che la superficie non si presenti asciutta. Tramite la seguente espressione è così possibile computare la massa volumica del campione:

$$\rho_{SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

dove

ρ_{SSD} è la massa volumica con il metodo saturo a superficie asciutta;

m_1 è la massa in aria del provino asciutto (g);

m_2 è la massa in acqua del provino (g);

m_3 è la massa satura a superficie asciutta del provino (g);

ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova (Mg/m³).

Per il calcolo dei vuoti residui ci si attiene a quanto indicato nella norma BS EN 12697-8:2018.

Nel calcolo compaiono la MMVT e la massa volumica precedentemente descritte. Si esegue il seguente calcolo:

$$v = \frac{MMVT - \rho_{SSD}}{MMVT} \times 100$$

dove

v è la percentuale dei vuoti residui del campione (%);

MMVT è la massima massa volumica teorica del campione (g);

ρ_{SSD} è la massa volumica ottenuta dopo compattazione (g).

SAGOMATURA PROVINI E CALIBRAZIONE VUOTI

Per quanto detto nella parte iniziale di questo capitolo, alcuni provini sono da testare in campo viscoelastico lineare per la valutazione del modulo dinamico e, in un secondo momento, vengono testati a rottura per valutarne il comportamento a fatica. Questi provini, in particolare, sono ottenuti con alcuni passaggi in più rispetto ai provini per il mix design e a quelli da testare a rottura per trazione indiretta. Mentre questi ultimi, infatti, sono già pronti una volta estrusi dalla fustella a seguito di compattazione, gli altri hanno bisogno di essere sagomati opportunamente.

Sulla base dell'equazione presente nel capitolo relativo alla MMVT, si progetta un provino con altezza target di 170 mm e diametro di 150 mm e lo si realizza per mezzo della pressa giratoria; affinché questo abbia una percentuale dei vuoti scelta, bisogna però inserire solo una percentuale della massa prevista dall'equazione. Tramite la

procedura esposta nel capitolo precedente, si ottiene così il valore scelto dei vuoti geometrici che si discosta necessariamente di una certa quantità dal valore dei vuoti misurati, data la complessità del sistema in esame.

Una volta valutata la volumetria del provino intero, si passa al carotaggio del provino per mezzo di una macchina carotatrice, provvista di sistema di bloccaggio del provino e dispositivo di raffreddamento ad acqua con vaschetta di raccolta, tramite cui se ne estrae una carota avente diametro di 100 mm.

Per ottenere l'altezza target di 130 mm vengono tagliate le facce del provino cilindrico per mezzo di una taglierina a disco diamantato. La profondità del taglio varia in base al gradiente di vuoti residui prodotti dalla pressa giratoria relativamente al materiale utilizzato; il metodo suggerito in base all'esperienza di laboratorio consiste nell'eliminare i seguenti spessori:

Faccia superiore	25 mm
Faccia inferiore	15 mm

Tabella 12 - Spessori di taglio in fase di sagomatura dei provini

Dopo aver sagomato i provini se ne misura l'altezza in quattro punti e se ne valuta la corretta geometria per mezzo di una squadra da laboratorio.

A questo punto, tramite la procedura già esposta, bisogna valutare la percentuale dei vuoti residui dei provini sagomati che è minore di quella dei provini interi poiché l'efficacia della compattazione è maggiore nel nucleo.

Tramite la procedura di calibrazione dei vuoti si mira ad ottenere un valore dei vuoti residui pari a $6,50 \pm 0,50$ punti percentuali per i provini sagomati.

PROVE MECCANICHE

PROVA DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA

La prova di resistenza a trazione indiretta, in configurazione “brasiliana”, è una prova di rottura di tipo classico attraverso cui si indaga il comportamento a rottura di un provino con diametro di 100 mm e altezza di 70 mm e viene effettuata conformemente alla normativa europea EN 12697-23. Nello specifico, se ne ricava il seguente parametro meccanico:

$$RTI = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot h} \cdot 1000$$

dove:

RTI è la resistenza a trazione indiretta (MPa);

P è il carico massimo applicato (kN);

d è il diametro del campione (mm);

h è l'altezza del campione (mm).

Il parametro RTI viene indicato anche come ITS (Indirect Tensile Strength).

La procedura di preparazione consiste nel posizionare il provino in un castelletto di carico, dotato di due strips che permettono di ammorsare superiormente ed inferiormente il campione e distribuire uniformemente il carico trasmesso dalla traversa del macchinario nel quale viene inserito, come mostrato in figura:

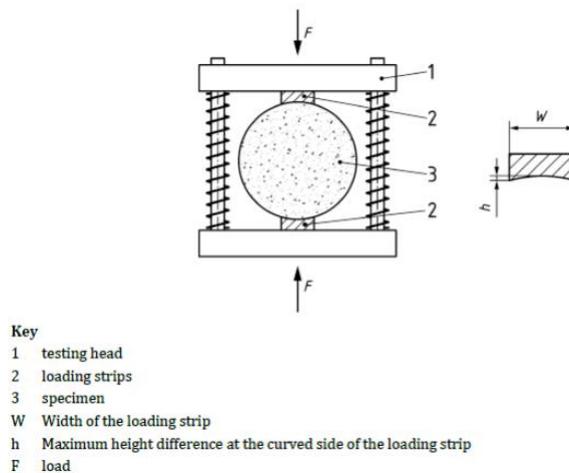


Figura 12 - Castelletto di ammorsamento del provino

Per questo test sono stati utilizzati sia la pressa statica che la UTM-30. La prima è stata utilizzata per testare i campioni alle basse temperature (4°C) poiché presenta una capacità di carico massima di 50 kN ed i provini testati hanno mostrato resistenze nell'intorno di questo carico; per i test sui provini alle temperature intermedie (20°C e 25°C), invece, si è preferito utilizzare la UTM-30 poiché si è mostrato sufficiente un carico massimo di 30 kN (capacità di carico della UTM-30) ed il macchinario ha il vantaggio di raccogliere un numero maggiore di punti sperimentali.

In entrambi i casi, la prova viene condotta in controllo di deformazione alla velocità di 50.8 mm/s e consiste nell'apporre il castelletto contenente il provino tra le due traverse del macchinario; il provino viene sollecitato da forze verticali che lo deformano, rispetto alla linea di carico, sia in direzione perpendicolare, dando luogo a tensioni di trazione, sia in direzione verticale, generando tensioni di compressione. Tale prova è di tipo distruttivo poiché le tensioni di trazione che si generano per effetto dell'applicazione del carico portano a rottura il campione.

La macchina, attraverso un trasduttore collegato ad un computer, registra delle coppie Forza-spostamento verticale che vengono restituite in forma numerica, salvo poter

essere collocate in un piano cartesiano per la definizione delle curve caratteristiche, come in figura:

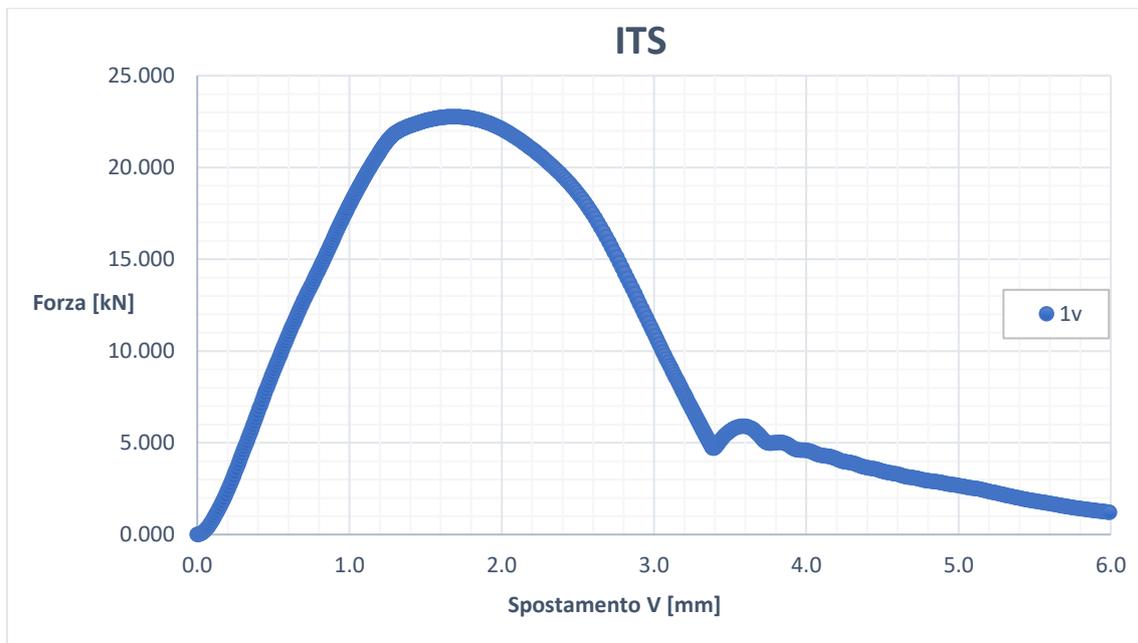


Figura 13 - Esempio di curva Forza-Spostamento verticale

Il provino perviene a rottura nel modo mostrato in figura:

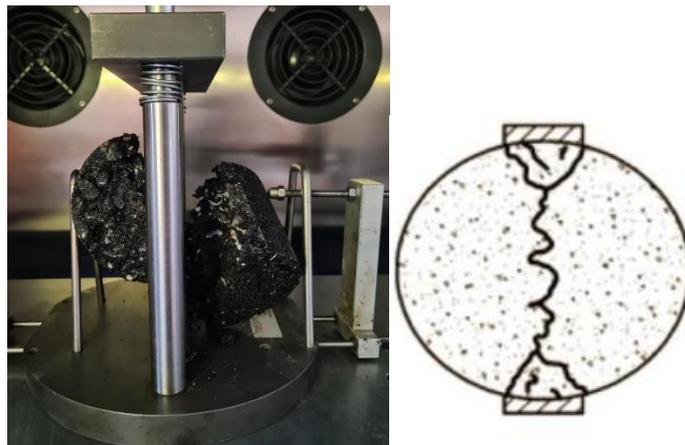


Figura 14 - Modalità di frattura dopo prova di trazione indiretta

MODULO DINAMICO

L'analisi delle caratteristiche di rigidità dei provini sagomati avviene nel campo viscoelastico lineare. Per garantire il rispetto della condizione di linearità, si sottopone il provino ad una prova che garantisca un livello deformativo sufficientemente basso.

La prova scelta è una prova di compressione dinamica con carico sinusoidale effettuata per mezzo della UTM-30 o dell'Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT), in conformità a quanto suggerito dalla AASHTO T378-17. Nel presente studio sono stati utilizzati entrambi i macchinari.

Per ciò che concerne questa prova, la AMPT e la UTM-30 operano seguendo lo stesso principio, sebbene presentino alcune differenze operative nella fase di installazione dei provini e nel mantenimento della temperatura in cella.

Volendo riassumere la fase di installazione del provino, questo viene appoggiato tra una piastra metallica superiore ed una inferiore che fanno da interfaccia con le parti solidali al macchinario con le quali vanno a contatto: superiormente, il pistone attuato idraulicamente che trasmette il carico; inferiormente, il piano di appoggio. Dei supporti disposti a 120° gli uni dagli altri offrono alloggio a tre trasduttori LVDT installati parallelamente all'asse verticale del cilindro atti alla misurazione delle deformazioni assiali.

La prova consiste nell'applicazione di una tensione normale di compressione oscillante, con legge sinusoidale, a diverse frequenze prestabilite. In particolare, il macchinario applica 10 cicli di carico per ognuna delle frequenze elencate:

- 25 Hz
- 20 Hz
- 10 Hz
- 5 Hz

- 2 Hz
- 1 Hz
- 0.5 Hz
- 0.2 Hz
- 0.1 Hz

La deformazione media imposta è compresa nell'intervallo 75-125 $\mu\epsilon$ e, affinché questa venga rispettata, la macchina effettua una fase di calibrazione tramite l'applicazione di dieci impulsi prima di ogni frequenza testata.

Dal modulo complesso E^* ottenuto da una prova con carico sinusoidale si ottengono due parametri: il modulo dinamico (norma del modulo complesso) e la fase. Il macchinario restituisce in output il valor medio (su dieci cicli) di tali parametri al variare della frequenza di carico.

Va sottolineato che durante la prova il materiale, essendo sollecitato a compressione, manifesta un piccolo contributo di deformazione permanente (creep) che viene sottratta a quella ciclica, trascurandone il contributo per quanto concerne la presente analisi.

I provini vengono testati a tre diverse temperature:

- 4° C
- 20° C
- 40° C

Le coppie modulo dinamico-frequenza di carico ($|E^*|/f$) così ottenute vengono riportate ad una predefinita condizione di riferimento facendo ricorso al principio di sovrapposizione tempo-temperatura e poi plottate nel piano bi-logaritmico $\log(|E^*|)$ -

$\log(f_r)$. Si ricavano quindi le funzioni di traslazione (*shift factors*) tramite l'equazione di Arrhenius:

$$\log[a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

dove:

- $a(T)$ è lo shift factor
- ΔE_a è un parametro noto
- T è la temperatura a cui è stato misurato il rispettivo modulo dinamico
- T_r è la temperatura scelta come riferimento per la traslazione

La traslazione delle curve avviene tramite la seguente formula:

$$\log f_r = \log f + \log [a(T)]$$

dove:

- f, f_r sono rispettivamente la frequenza relativa alla temperatura di misurazione e la frequenza ridotta
- $\log[a(T)]$ è lo shift factor

L'equazione che permette la modellazione delle curve maestre, in conformità a quanto esposto nella AASHTO PP61-13, è di forma sigmoideale:

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot (f_r)}}$$

dove:

- $|E^*|$ è il modulo dinamico
- f_r è la frequenza ridotta

- δ è il valore minimo di $|E^*|$
- $\delta+\alpha$ è il valore massimo di $|E^*|$
- β, γ sono dei parametri di forma della funzione sigmoidale

Nel seguente grafico si mostra il significato geometrico dei parametri di forma:

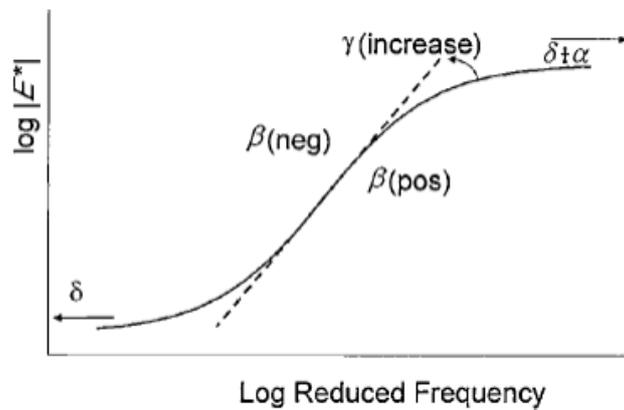


Figura 15 - Significato geometrico dei parametri di forma del modello sigmoide

Con l'aiuto dello strumento Risolutore di Microsoft Excel, il fitting del modello sigmoidale ai dati sperimentali avviene minimizzando la somma degli scarti tra il $\log(|E^*|)_{\text{modello}}$ e il $\log(|E^*|)_{\text{misurato}}$, facendo variare i parametri del modello a partire dai seguenti valori iniziali:

Parametri	Iniziali
α	6
δ	0.5
β	-1
γ	-0.5
ΔE_a	200000

Tabella 13 - Parametri di partenza per il fitting al modello sigmoide

Si riporta a titolo esemplificativo il grafico di una curva maestra, comprensiva di modulo e fase:

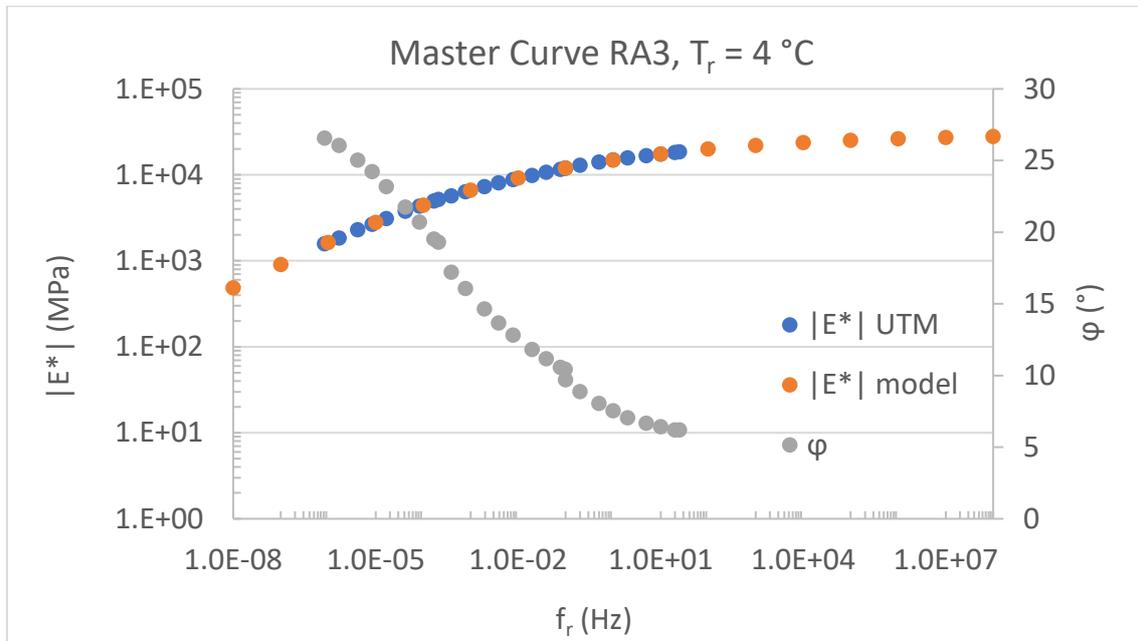


Figura 16 - Esempio di Curva Maestra

RESISTENZA A FATICA – Prova di trazione monoassiale diretta ciclica

Il conglomerato bituminoso soggetto ai carichi veicolari (di tipo ciclico), superato il campo viscoelastico lineare, subisce un progressivo deterioramento dovuto alla comparsa di fessure che si propagano al suo interno fino al raggiungimento di una condizione di rottura.

Il meccanismo di rottura a fatica è legato ad una variazione di rigidità che decresce in maniera non lineare all'aumentare del numero dei cicli di carico. Come parametro rappresentativo della rigidità, al pari delle analisi del capitolo precedente, è stato assunto il modulo dinamico (come output della prova è possibile ottenere anche la fase). Per i provini testati, la condizione di rottura del provino è stata assunta

convenzionalmente come la configurazione in cui si ha il dimezzamento del modulo dinamico.

La prova è effettuata tramite la già menzionata AMPT e viene condotta a deformazione controllata, in modo tale da ottenere un elevato numero di punti sia pre-rottura che post-rottura, poiché al diminuire della rigidezza, dovendo mantenere costante l'ampiezza della deformazione imposta, il macchinario modula la tensione, diminuendola. Questo porta ad una minore dissipazione energetica.

Bisogna sottolineare che le prove di fatica effettuate in laboratorio sono sì utili ai fini del confronto tra i diversi tipi di miscele, ma possono dare una buona indicazione riguardo alla resistenza reale del conglomerato in situ solo se opportunamente scalate tramite opportuni fattori di correzione. Ciò è dovuto al fatto che le condizioni di laboratorio sono più gravose di quelle reali, in quanto il traffico (i cicli di carico) non è sempre canalizzato lungo le stesse direttrici ed inoltre si potrebbero avere degli intervalli di tempo in cui il conglomerato è scarico, prestandosi ad eventuali fenomeni di auto-riparazione.

La prova in questione è effettuata in conformità al metodo AASHTO TP107-18.

Il test consiste nel sottoporre il provino cilindrico di altezza 130 mm e diametro 100 mm, opportunamente incollato a due piastre metalliche e condizionato alla temperatura desiderata, ad un carico ciclico di trazione diretta lungo l'asse verticale.

L'apparecchiatura è schematizzata nella figura seguente:

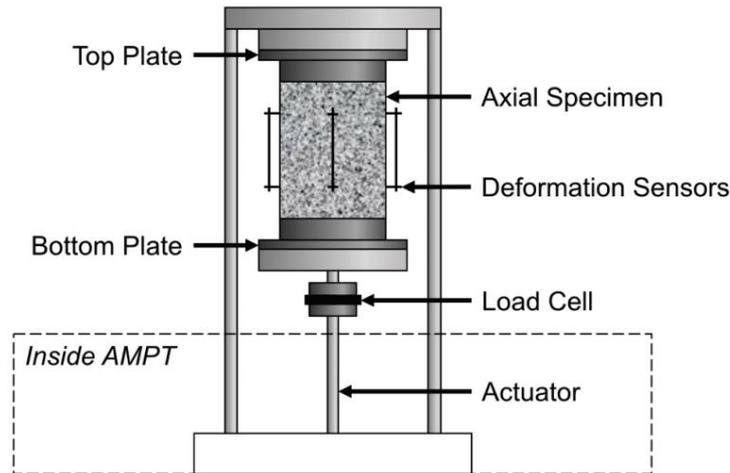


Figura 17 - AMPT schematizzata

Si elencano i parametri utilizzati:

- Temperatura provino: 15° C
- Frequenza: 10 Hz
- Deformazione iniziale: 170 $\mu\epsilon$

La configurazione dei trasduttori LVDT è la stessa descritta nel sottocapitolo precedente, con una lunghezza nominale di 70 mm.

E' importante notare che la prova è molto delicata ed alcuni fattori che potrebbero influire negativamente sulla buona riuscita della stessa possono essere un'eventuale eterogeneità eccessiva all'interno del campione stesso ed una non accurata sagomatura, in quanto variazioni dell'ordine del decimo di millimetro nell'altezza del provino possono risultare decisive affinché la deformazione imposta risulti dannosa in alcuni punti; questa infatti viene intesa dal macchinario come media delle deformazioni dei tre trasduttori, quindi una eventuale differenza geometrica o fisica in corrispondenza di uno

dei trasduttori comporterebbe un'eccessiva variazione di tensione rispetto agli altri punti.

Il risultato della prova è un punto nel piano deformazione iniziale-numero di cicli a rottura (N_f, ϵ_0).

Il grafico seguente mostra, a titolo di esempio, l'andamento del modulo dinamico all'aumentare dei cicli di carico, per una deformazione iniziale imposta di $170 \mu\epsilon$:

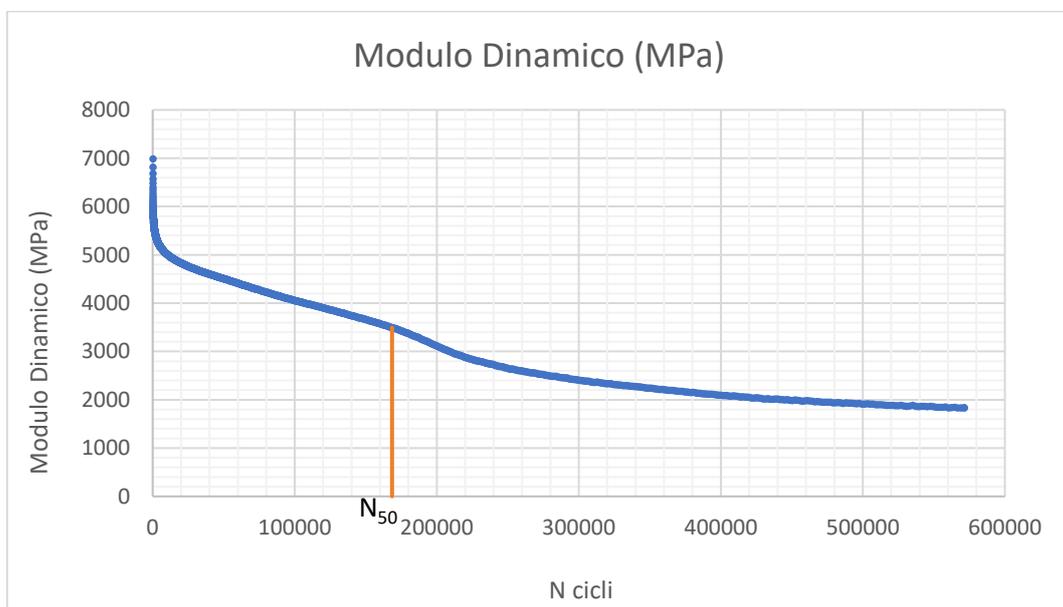


Figura 18 - Esempio di curva di decadimento del modulo dinamico

La rottura non deve avvenire in posizione periferica, ma in corrispondenza dei 70 mm di lunghezza dei trasduttori. In caso contrario, la prova è da scartare. Questo vincolo è giustificato dal fatto che la AMPT calibra la forza da applicare affinché la deformazione sia pari a quella imposta proprio nella parte centrale del provino, dunque ci si aspetta che il provino si rompa nella fascia centrale affinché la prova sia coerente.



Figura 19 - Modalità di rottura ideale dopo prova di fatica

ANALISI DEI RISULTATI

Il presente capitolo tratta dell'analisi dei risultati ottenuti durante la fase della sperimentazione. E' suddiviso in:

- Analisi dei risultati in fase di mix design
- Analisi dei risultati in fase di confezionamento dei provini e dei test meccanici

In particolare, nella parte relativa alla fase del progetto di miscela (mix design) si espongono le scelte progettuali effettuate e le si motivano sulla base dei risultati intermedi ottenuti, mentre nella parte relativa alla fase delle prove meccaniche vere e proprie si effettua un'analisi completa degli output dei test nelle diverse configurazioni di prova, opportunamente rielaborati secondo i modelli visti nel capitolo precedente.

ANALISI DEI RISULTATI IN FASE DI MIX DESIGN

In questo sottocapitolo si descrivono le scelte progettuali effettuate per determinare la composizione dei tre tipi di miscela protagonisti del presente lavoro di tesi:

- MIX-V
- MIX-RA
- MIX-RE

MIX-V

Un'importante decisione progettuale ha riguardato la scelta del fuso granulometrico e della curva obiettivo a cui fare riferimento per la definizione della miscela di aggregati di progetto. Essendo i materiali provenienti da uno specifico stabilimento, oltre alle

curve del capitolato CIRS, si sono avute a disposizione le curve fornite dallo stabilimento in questione.

Lo stabilimento ha fornito una ricetta proprietaria che è stata scartata alla luce di alcune incongruenze tra le quali un esito diverso dell'analisi granulometrica sull'aggregato rispetto alle analisi di laboratorio effettuate nel presente studio e, ad ogni modo, una curva di progetto la cui ottimizzazione in fase di mix design risulta di difficile interpretazione.

Nel presente lavoro di tesi, quindi, si presenta una ricetta che rispecchi in maniera adeguata i vincoli progettuali relativi allo scheletro litico.

Per quanto riguarda il fuso granulometrico limite, le opzioni al vaglio sono state le seguenti:

- Fuso granulometrico proprietario
- Fuso granulometrico vecchio CIRS
- Fuso granulometrico nuovo CIRS AC16
- Fuso granulometrico nuovo CIRS AC20

I fusi AC16 e AC20 si riferiscono a due spessori differenti relativamente ad uno strato di collegamento per pavimentazione flessibile in conglomerato bituminoso.

Per ciò che concerne la scelta della curva obiettivo, le opzioni al vaglio sono state:

- Curva granulometrica media del fuso proprietario (centro fuso)
- Curva granulometrica di progetto dello stabilimento proprietario

Si è optato per l'utilizzo del fuso granulometrico proprietario e la scelta della curva granulometrica obiettivo è ricaduta sul centro di tale fuso.

Si sono avute a disposizione le classi granulometriche 0/8, 3/8, 8/18, oltre al passante allo 0.063 mm (filler). Sulla base delle curve granulometriche disponibili a seguito della caratterizzazione, si è pervenuti, tramite la minimizzazione degli scarti quadratici descritta in precedenza, alla seguente curva di progetto:

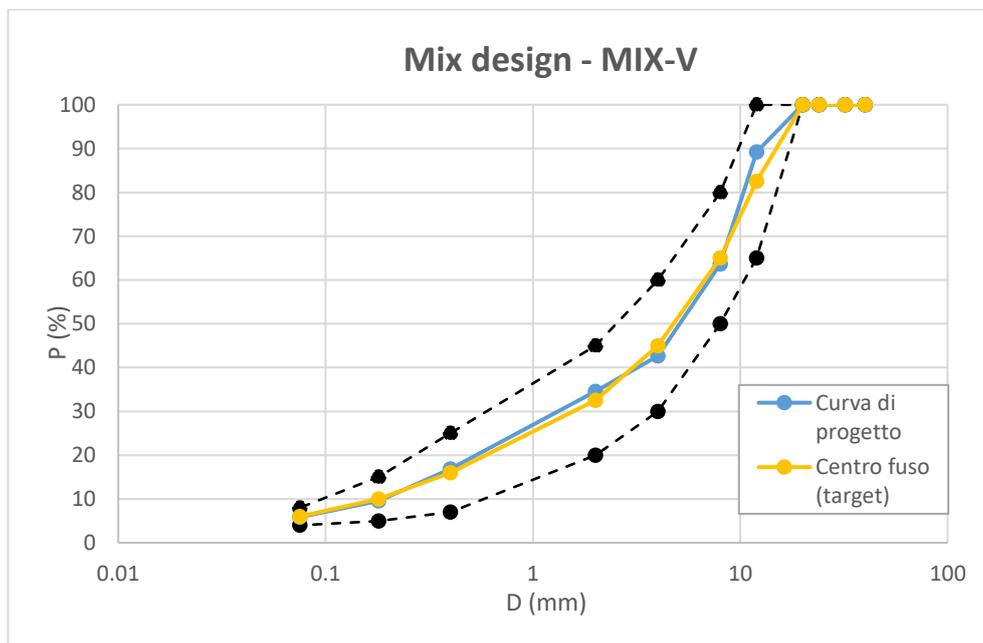


Figura 20 – Curva di progetto per MIX-V

La curva di progetto è nel seguito espressa in termini di passante ai setacci della serie utilizzata dallo stabilimento, per cui sono state effettuate delle trasposizioni rispetto alla serie utilizzata in sede di determinazione dell'assortimento granulometrico di ciascuna classe di aggregato.

Setacci	Centro fuso (target)	Curva di progetto
	P (%)	P (%)
D (mm)		
40	100.00	100.00
32	100.00	100.00
24	100.00	100.00
20	100.00	100.00
12	82.50	89.19
8	65.00	63.65
4	45.00	42.68
2	32.50	34.57
0.4	16.00	16.82
0.18	10.00	9.53
0.075	6.00	5.86

Tabella 14 - Valori numerici delle curve per il mix design di MIX-V

I coefficienti ponderali risultanti dall'ottimizzazione portano, per il solo scheletro litico, alla seguente ricetta (in termini di percentuale su peso di aggregato totale):

	Classe dimensionale		
	0/8	8/18	Filler
% scheletro litico	43.8	51.7	4.5

Tabella 15 - Ricetta miscela di aggregati per MIX-V

Si può notare come la frazione 3/8 risulti esclusa dalla miscela di aggregati poiché l'ottimizzazione non l'ha prevista; evidentemente l'apporto che l'aggregato 3/8 dà alla miscela di aggregati viene colmato dalle altre due classi.

Per quanto riguarda il bitume, si è scelto di utilizzare una percentuale di primo tentativo del 4.5% su peso di aggregato. Per semplicità di calcolo, il dosaggio di bitume è stato espresso in percentuale su peso di aggregato.

Si riportano, in un prospetto sintetico, i dati dello studio volumetrico effettuato su tre provini per la ricetta del MIX-V analizzata, considerando tre percentuali di bitume:

%B _{agg} = 4.5			%B _{agg} = 4.7			%B _{agg} = 5		
ID PROVINO	V ₁₀₀ (%)	V ₁₈₀ (%)	ID PROVINO	V ₁₀₀ (%)	V ₁₈₀ (%)	ID PROVINO	V ₁₀₀ (%)	V ₁₈₀ (%)
1	5.99	-	1	4.29	-	1	4.27	-
2	-	-	2	5.30	-	2	3.10	-
3	6.00*	4.38	3	5.78*	4.27	3	5.58*	3.92
4	5.45*	3.91	4	5.27*	3.86	4	4.82*	3.02
MEDIA	5.99	4.15	MEDIA	4.80	4.06	MEDIA	3.69	3.47

*valore (calcolato) di vuoti residui a 100 giri per un provino compattato a 180 giri (escluso dalla media)

Tabella 16 - Percentuali dei vuoti per studio volumetrico in fase di mix design

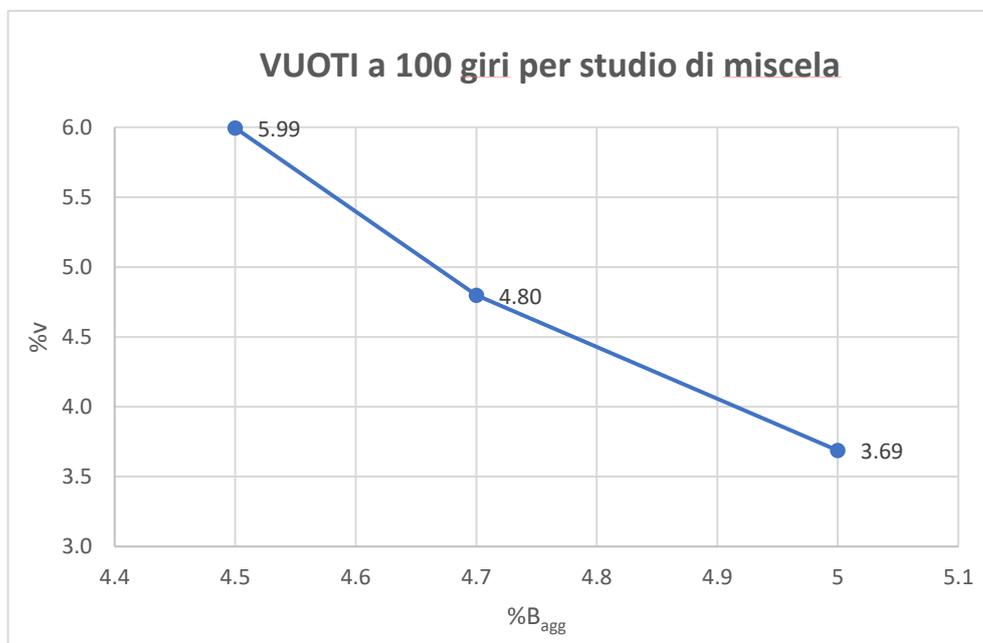


Figura 21 - Vuoti a 100 giri per studio di miscela

I provini riportati in tabella sono stati compattati a numero di giri, cioè a parità di energia fornita per la compattazione; i provini 1 e 2 sono stati compattati a 100 giri, mentre i provini 3 e 4 sono stati compattati a 180 giri.

Come già menzionato, l'intervallo CIRS suggerisce che la percentuale di bitume sia inclusa nell'intervallo 4.5%-5.5%; il valore accettato per la percentuale dei vuoti (per strato di collegamento), invece, è compreso nell'intervallo 3%-5% per provini compattati a 100 giri e dev'essere maggiore del 2% per provini compattati a 180 giri. Come si può notare dalla tabella, i valori della percentuale dei vuoti relativi al provino con $%B_{agg} = 4.7$ rispettano tali limiti. Cautelativamente ci si è voluti mantenere ad un valore dei vuoti leggermente più alto del valor medio dell'intervallo poiché ci si aspettava, al più, che le miscele MIX-RA e MIX-RE fossero maggiormente chiuse rispetto al MIX-V.

Si riporta la ricetta completa per la miscela MIX-V:

	Classe dimensionale			
	0/8	8/18	Filler	Bitume
% su peso di aggregato	43.8	51.7	4.5	4.7

Tabella 17 - Ricetta per MIX-V

MIX-RA

Il MIX-RA, come già menzionato, dev'essere una miscela avente la stessa granulometria del MIX-V, ma a differenza di questa contiene il 50% in peso di fresato oltre agli ingredienti vergini. Bisogna sottolineare che la quantità in peso di fresato contenuto nel MIX-RA è riferita al peso di RA tal quale sul peso totale di conglomerato bituminoso finale; di conseguenza, sebbene la curva granulometrica sia stata ottimizzata considerando il contributo dell'aggregato-RA (RA white), nella ricetta è poi stato inserito il RA tal quale (RA black).

La curva di progetto del MIX-RA è stata ottimizzata rispetto alla curva di progetto del MIX-V cosicché si sia potuto ottenere uno scheletro litico simile, come mostrato nel seguente grafico:

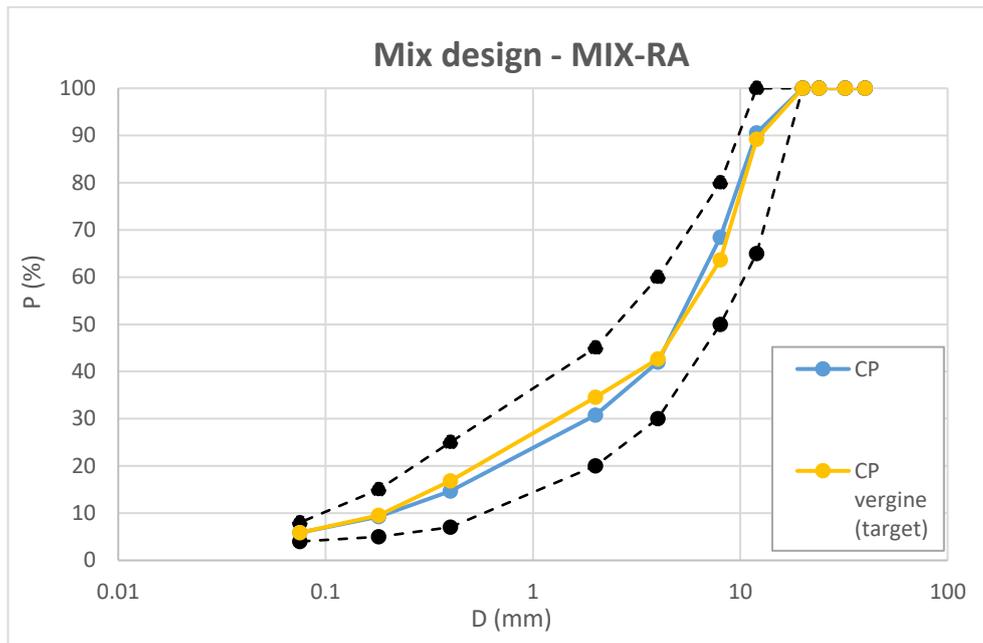


Figura 22 - Curva di progetto per MIX-RA

Come si evince da una prima analisi visiva, l'ottimizzazione ha portato ad un buon risultato e le curve si sovrappongono in maniera soddisfacente. Si riporta il passante ai setacci nel prospetto che segue.

Setacci D (mm)	CP vergine (target)	CP
	P (%)	P (%)
40	100.00	100.00
32	100.00	100.00
24	100.00	100.00
20	100.00	100.00
12	89.19	90.52
8	63.65	68.44
4	42.68	42.00
2	34.57	30.75
0.4	16.82	14.68
0.18	9.53	9.26
0.075	5.86	5.86

Tabella 18 - Valori numerici delle curve per il mix design di MIX-RA

I coefficienti ponderali risultanti dall'ottimizzazione portano, per il solo scheletro litico, alla seguente ricetta (in termini di percentuale su peso di aggregato totale):

	Classe dimensionale			
	0/8	8/18	Filler	Aggregato-RA
% scheletro litico	16.88	32.22	01.04	49.86

Tabella 19 - Ricetta miscela di aggregati per MIX-RA

Per il calcolo delle quantità relative da inserire nella ricetta del MIX-RA si è reso necessario conoscere la percentuale di bitume contenuto nel RA (espressa su peso di aggregato-RA), che è stata ottenuta tramite prova ad ignizione mediando i valori di quattro campioni, come nella tabella seguente.

Prova	%B_{agg-RA}
1	4.83
2	5.14
3	5.25
4	4.73
Media	5.0
Dev. St.	0.25

Tabella 20 - Bitume contenuto nel RA

Il 5% di bitume espresso su peso di aggregato-RA diventa il 4.76% se espresso su peso di RA.

Infine, la ricetta prevista per il MIX-RA è qui espressa in termini percentuali su peso di conglomerato bituminoso (CB):

	Classe dimensionale				Bitume
	0/8	8/18	Filler	RA	
% su peso di CB	16.12	30.77	0.99	50	2.11

Tabella 21 - Ricetta per MIX-RA

Dove le quantità sono riferite ai materiali da inserire.

Un'analisi di verifica sul conglomerato bituminoso prodotto per quanto concerne la granulometria della miscela ed il contenuto di bitume ha confermato la bontà del progetto e della sua realizzazione, come nel grafico seguente.

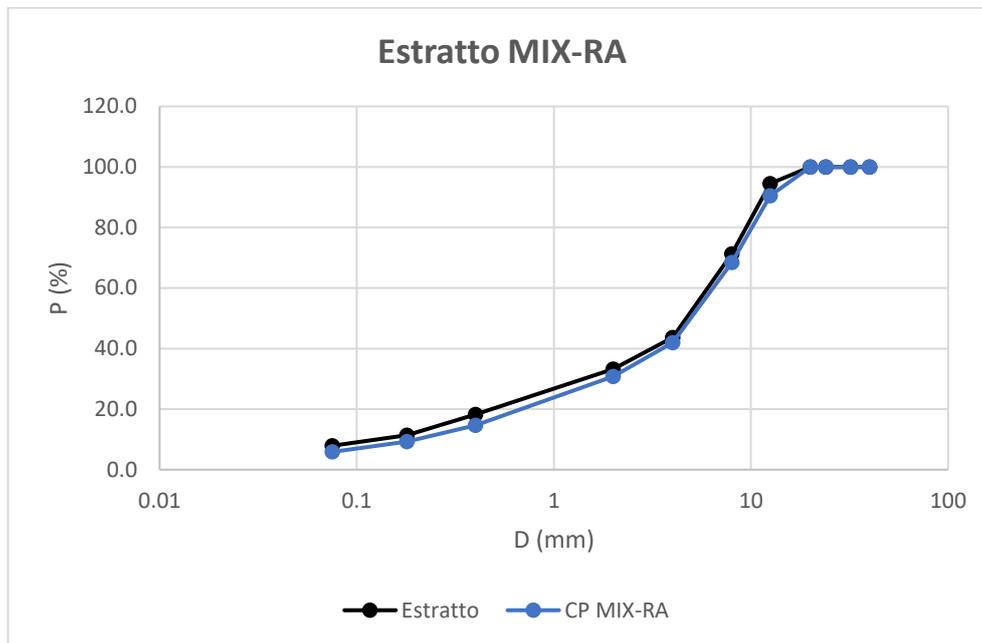


Figura 23 - Verifica assortimento granulometrico MIX-RA

La quantità di bitume ottenuta tramite ignizione è pari a $\%B_{agg}=4.89$, coerentemente con quanto progettato (4.7%), considerando la grande eterogeneità del RA.

MIX-RE

Come si è avuto modo di chiarire più volte, l'aspetto più delicato del progetto della miscela "MIX-RA" risiede nell'ipotesi che si fa riguardo al grado di blending. Nel presente studio si è fatta l'assunzione di total blending, cioè si è ipotizzato che la totalità del bitume contenuto nel RA venga riattivato.

La miscela contenente il 50% di RA ed additivata con il rejuvenator presenta la stessa ricetta della miscela MIX-RA, con l'aggiunta di una piccola quantità di rejuvenator:

- Rej = 8% su peso di bitume contenuto nel RA
- ↓
- Rej = 0.19% su peso di CB

Un'analisi di verifica sul conglomerato bituminoso prodotto per quanto concerne la granulometria della miscela ed il contenuto di bitume ha confermato la bontà del progetto e della sua realizzazione:

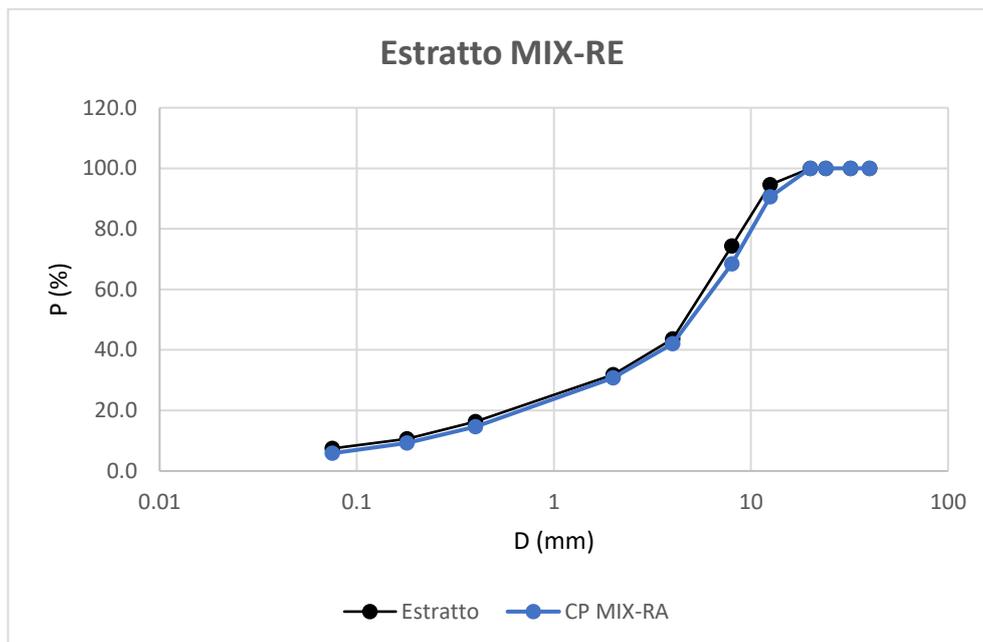


Figura 24 - Verifica assortimento granulometrico MIX-RE

La quantità di bitume ottenuta tramite ignizione è pari a $\%B_{agg}=4.77$, coerentemente con quanto progettato (4.7%).

SINTESI DATI VOLUMETRICI

Si riporta un prospetto sintetico della volumetria delle tre miscele:

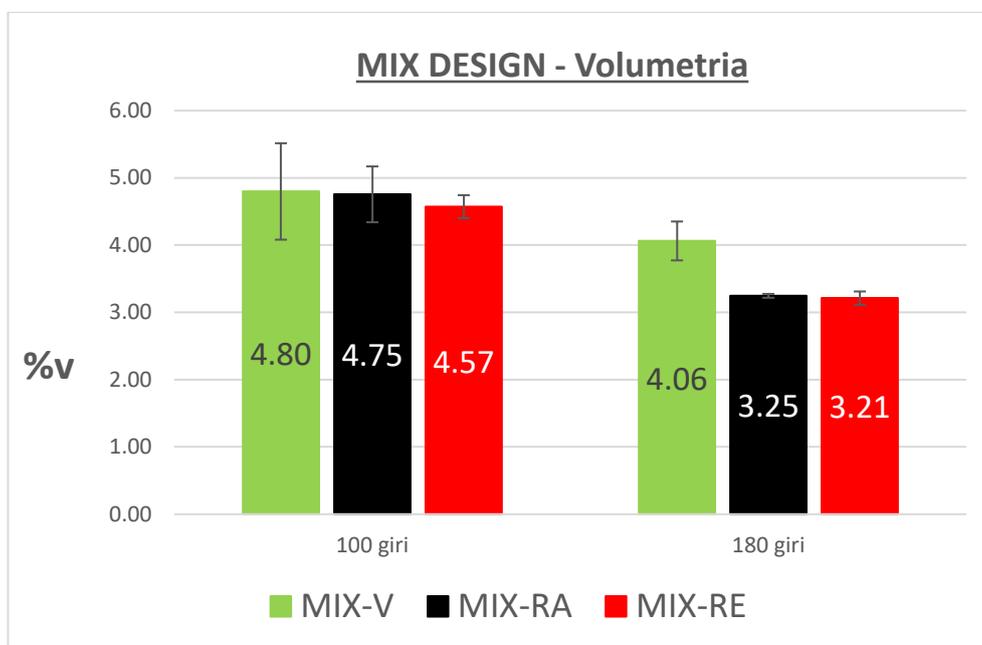


Figura 25 - Sintesi dati volumetrici miscele per mix design con 4.7% di bitume

	Percentuale dei vuoti		Deviazione Standard	
	(%)		(%)	
	100 giri	180 giri	100 giri	180 giri
MIX-V	4.80	4.06	0.72	0.29
MIX-RA	4.75	3.25	0.42	0.03
MIX-RE	4.57	3.21	0.17	0.10

Tabella 22 - Sintesi dati volumetrici miscele per mix design con 4.7% di bitume

Osservando i dati sopra riportati, si potrebbe notare una lieve diminuzione dei vuoti per la miscela contenente il rejuvenator, ma l'elevata variabilità dei valori impone cautela nella valutazione, come si nota osservando le barre di errore sulle colonne

dell'istogramma. Per la fase di mix design è importante confermare che la volumetria rispetti i limiti CIRS per tutte e tre le miscele.

Emerge chiaramente dalla lettura dei grafici, invece, come a 180 giri si manifesti un abbassamento del valore dei vuoti per quanto riguarda le miscele MIX-RA e MIX-RE. E' possibile affermare che queste due miscele si sono chiuse più velocemente avendo aumentato l'energia fornita nella compattazione.

ANALISI DEI RISULTATI IN FASE DI CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI E DEI TEST MECCANICI

In questo sottocapitolo si descrivono e si analizzano le caratteristiche dei provini realizzati e gli esiti delle prove sperimentali effettuate.

Note le caratteristiche dei materiali e le metodologie di caratterizzazione e di prova, nonché le caratteristiche compositive della miscela progettata nella prima fase della sperimentazione, è possibile passare alla discussione critica dei risultati ottenuti.

Dando seguito a quanto progettato nella fase di mix design, l'approccio rimane quello del confrontare i risultati ottenuti sui tre diversi tipi di miscela di conglomerato bituminoso: MIX-V, MIX-RA, MIX-RE. Nello specifico, alcuni aspetti vengono posti in evidenza mediante il confronto tra le caratteristiche fisiche dei provini e gli esiti dei test, mentre altri aspetti vengono analizzati tramite confronti con precedenti lavori di tesi.

LAVORABILITA'

Si analizzano separatamente i risultati ottenuti sui provini testati a trazione indiretta (ITS) e sui provini testati a modulo dinamico ed a fatica. Pur essendo composti dalle medesime miscele, sono provini di natura differente, essendo i primi dei provini sui quali il test è stato condotto sul provino grezzo, mentre i secondi sono provini che hanno

subito un processo di sagomatura (carotaggio e taglio) che li porta a raggiungere una diversa composizione dei vuoti.

Provini per ITS

I provini sottoposti alla prova di resistenza a trazione indiretta sono stati prodotti, tramite pressa a taglio girevole, secondo la modalità “a numero di giri”, vale a dire mantenendo costante l’energia fornita per la compattazione (100 giri).

Come già menzionato in precedenza, le dimensioni dei provini sono: altezza di 70 mm e diametro di 150 mm.

I test successivi alla compattazione sono stati effettuati alle medie e basse temperature (20°C e 4°C) e i relativi provini sono stati prodotti in due differenti lotti. Di conseguenza, vengono analizzati separatamente in modo tale da mettere in luce, nel peggiore dei casi, eventuali discordanze a scopo di verifica. In quest’ultimo caso le differenze sarebbero da attribuire alla variabilità del materiale o ad eventuali errori operativi. Nel seguito si analizzano le caratteristiche dei due differenti lotti.

Per quanto riguarda i provini testati a 4°C (si ricorda che la compattazione avviene a 150°C), la pressa a taglio girevole ha prodotto in output i seguenti parametri di lavorabilità:

ID	n giri	k	C1	MMVT
(-)	(-)	(-)	(-)	(Kg/m ³)
1v	100	8.4	79.7	2544
2v		8.8	78.5	
3v		8.77	78.9	

ID	n giri	k	C1	MMVT
(-)	(-)	(-)	(-)	(Kg/m ³)
1ra	100	9.12	78.1	2548

2ra		8.89	78.2	
3ra		9.6	77.3	

ID	n giri	k	C1	MMVT
(-)	(-)	(-)	(-)	(Kg/m ³)
1re	100	8.88	78.4	2551
2re		9.33	77.6	
3re		9.05	77.7	

Tabella 23 - Valori di lavorabilità per i provini da testare a 4°C

Dei parametri di lavorabilità e autoaddensamento delle tabelle si analizzano i valori medi negli istogrammi a barre di seguito riportati.

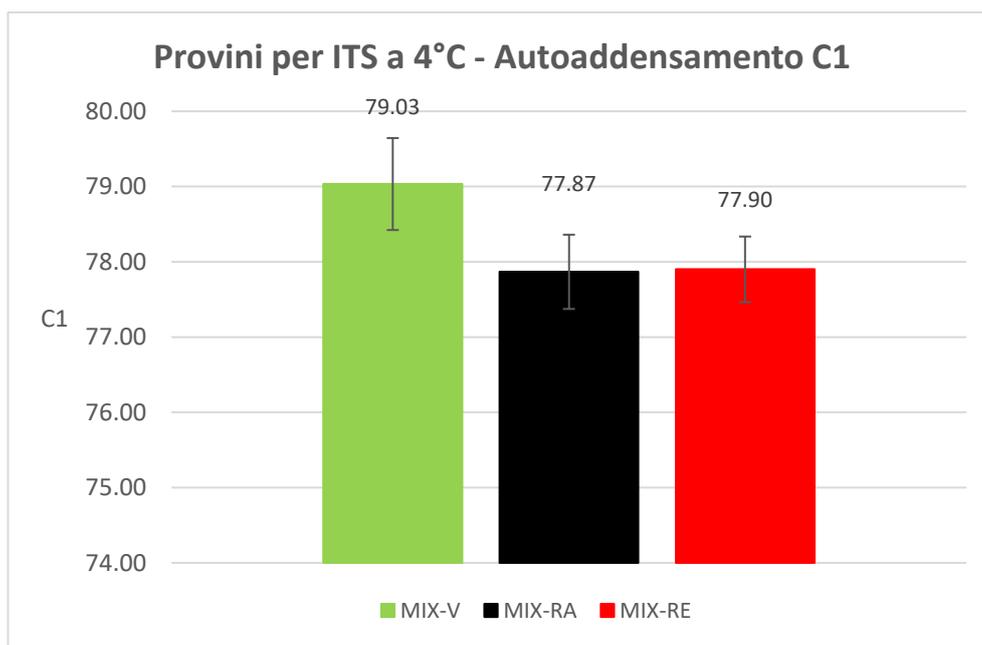


Figura 26 - Valori medi di autoaddensamento per provini da testare a 4°C

L'autoaddensamento C1 è il grado di compattazione dopo il primo giro della giratoria, corrispondente all'intercetta della retta di lavorabilità. Esso rappresenta l'assestamento del provino sotto il proprio peso. E' un parametro fortemente correlato allo scheletro litico e, poiché da progetto le tre miscele presentano stesso assortimento

granulometrico, dal confronto delle miscele è possibile mettere in risalto gli altri aspetti compositivi.

Con riferimento alla figura, il MIX-V presenta valori più elevati rispetto alle due miscele MIX-RA e MIX-RE, a prescindere dalla variabilità (vedi barre di errore); la presenza del rejuvenator pare non avere effetto sull'autoaddensamento. Il comportamento del MIX-V viene attribuito alla minor viscosità del legante vergine, il quale lubrifica gli aggregati e permette una migliore compattazione iniziale. Il risultato relativo al MIX-RE, invece, potrebbe essere sintomo della presenza di bitume più viscoso e, quindi, di una scarsa attivazione del bitume presente nel RA, ipotesi che ha bisogno di essere eventualmente corroborata da ulteriori evidenze sperimentali.

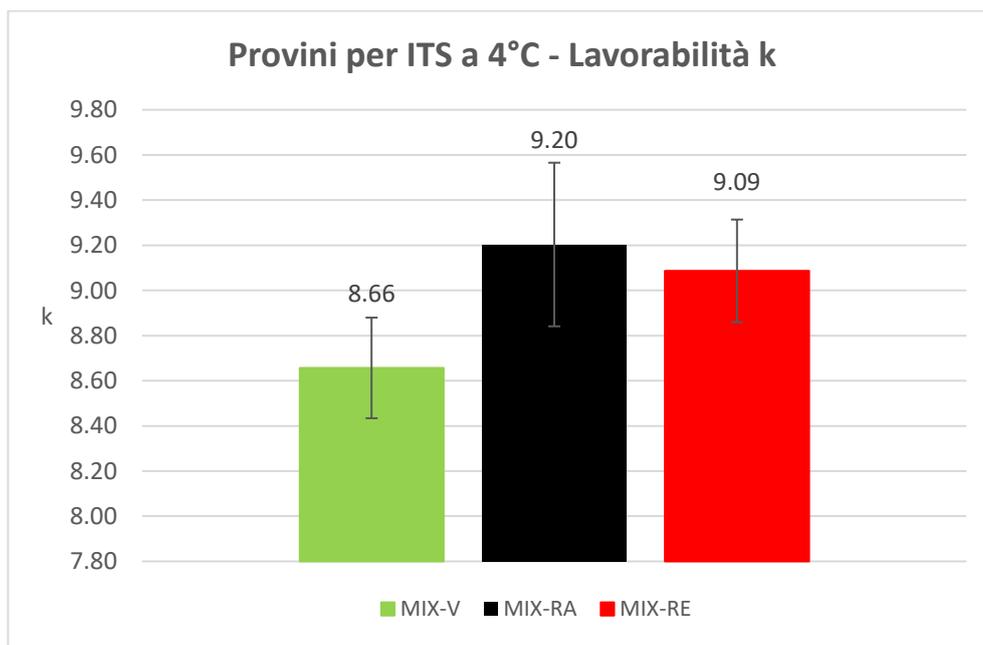


Figura 27 - Valori medi di lavorabilità per provini da testare a 4°C

La lavorabilità k non dipende dallo scheletro litico della miscela, ma dalle caratteristiche del legante.

Il grafico relativo alla lavorabilità mostra coerenza con quanto dedotto dal grafico sull'autoaddensamento. L'evidenza sperimentale indica infatti che il valore di k del MIX-V è inferiore a quello del MIX-RA e del MIX-RE. Tale effetto è in accordo con il meccanismo di compensazione per cui un provino che ha subito un assestamento importante all'inizio della compattazione, tenderà ad opporre maggior resistenza con l'avanzare della compattazione; quindi la retta di lavorabilità, attraverso il suo coefficiente k, tende ad essere meno pendente.

Per quanto riguarda i provini del lotto da testare a 20°C, e per quanto detto in precedenza, ci si aspetta che abbiano un comportamento simile a quello discusso finora. Si presentano nel seguito i valori ottenuti.

ID	n giri	k	C1	MMVT
(-)	(-)	(-)	(-)	(Kg/m ³)
4v	100	8.14	80.4	2539
5v		9.01	78.5	
6v		8.28	79.7	

ID	n giri	k	C1	MMVT
(-)	(-)	(-)	(-)	(Kg/m ³)
4ra	100	9.24	77.3	2543
5ra		9.07	77.3	
6ra		9.66	76.4	

ID	n giri	k	C1	MMVT
(-)	(-)	(-)	(-)	(Kg/m ³)
4re	100	9.3	76.7	2548
5re		9.2	76.6	
6re		9.99	76	

Tabella 24 - Valori di lavorabilità per i provini da testare a 20°C

Seguono gli istogrammi con i valori mediati.

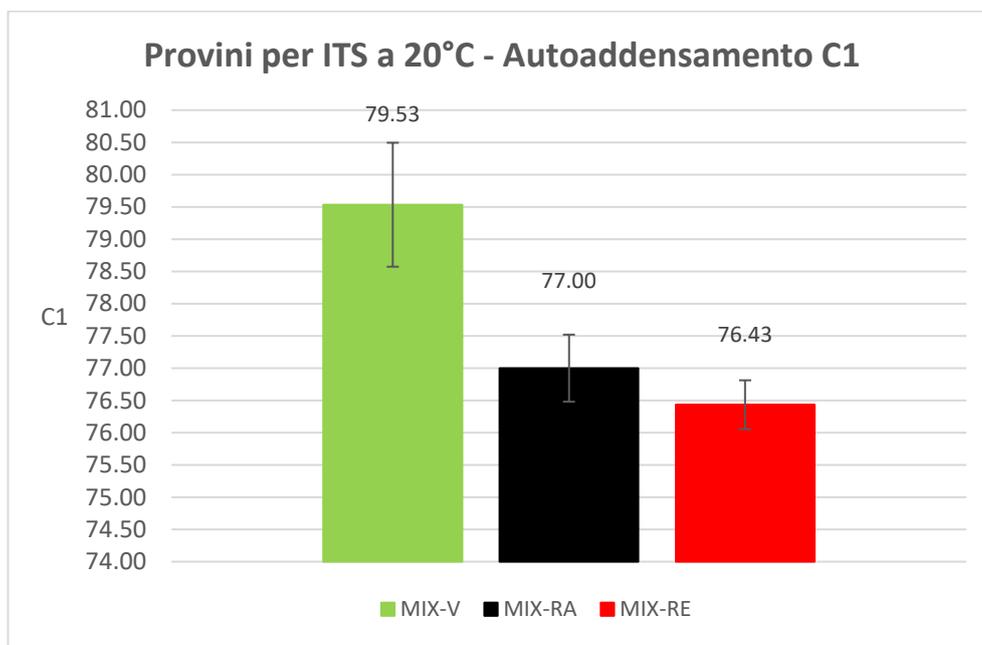


Figura 28 - Valori medi di autoaddensamento per provini da testare a 20°C

Il valore di autoaddensamento dei provini di MIX-V è superiore agli altri due. Inoltre i valori sono simili ai valori ottenuti per il precedente lotto. Si può confermare che non ci sono state differenze operative nelle procedure di confezionamento della miscela e di compattazione. Il valore relativo al MIX-RE, in questo caso, è leggermente inferiore a quello del MIX-RA, ma nei limiti della sua variabilità, essendo un valore mediato su tre provini. Entrambe le miscele MIX-RA e MIX-RE presentano inoltre valori leggermente inferiori a quelli del lotto precedente. Il confronto tra i tre mix, in ogni caso, conferma il trend precedente.

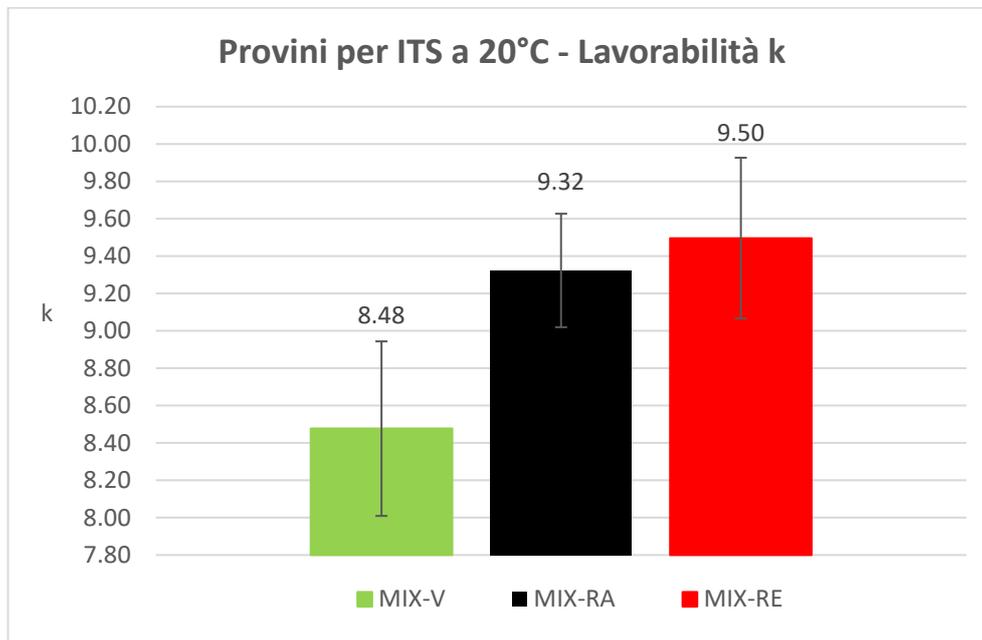


Figura 29 - Valori medi di lavorabilità per i provini da testare a 20°C

La lavorabilità k rispecchia i principi descritti in precedenza per cui la miscela che ha subito una compattazione iniziale più elevata tende ad opporre maggior resistenza al progredire della procedura di compattazione.

Provini per modulo dinamico e fatica

I provini da sottoporre ai test di fatica e per la ricerca del modulo dinamico, sono prodotti diversamente dai provini per ITS. Ad una prima fase di produzione del provino compattato (denominato "intero"), di altezza pari a 170 mm e diametro di 150 mm, segue la fase di sagomatura a seguito della quale il provino ("sagomato") presenta un'altezza di 130 mm ed un diametro di 100 mm.

La compattazione dei provini in questione è stata effettuata secondo la modalità "ad altezza". Si riportano le caratteristiche volumetriche ed il numero di giri dei provini ottenuti.

	ID	h_{media}	v	
	(-)	(mm)	(%)	
INTERO	V1	168.8	8.70	13 giri
SAGOMATO	V1	129.6	6.96	
INTERO	V2	168.6	7.93	16 giri
SAGOMATO	V2	129.8	6.32	
INTERO	V3	168.6	7.65	18 giri
SAGOMATO	V3	129.9	6.12	
INTERO	V4	168.6	8.03	17 giri
SAGOMATO	V4	130.2	6.23	
INTERO	V5	168.6	8.20	17 giri
SAGOMATO	V5	130.8	6.43	
INTERO	V6	168.5	8.05	17 giri
SAGOMATO	V6	129.8	6.44	

Tabella 25 - Caratteristiche volumetriche provini MIX-V per modulo dinamico e fatica

	ID	h_{media}	v	
	(-)	(mm)	(%)	
INTERO	RA1	168.4	7.98	14 giri
SAGOMATO	RA1	129.3	6.51	
INTERO	RA2	168.5	8.25	13 giri
SAGOMATO	RA2	129.7	6.36	
INTERO	RA3	168.6	7.74	22 giri
SAGOMATO	RA3	129.5	6.01	
INTERO	RA4	169.4	8.21	19 giri
CAROTATO	RA4	130.3	6.50	
INTERO	RA5	168.6	8.61	17 giri
CAROTATO	RA5	129.1	6.78	
INTERO	RA6	168.6	8.66	21 giri
CAROTATO	RA6	130.4	6.52	

Tabella 26 - Caratteristiche volumetriche provini MIX-RA per modulo dinamico e fatica

	ID	h_{media}	v	
	(-)	(mm)	(%)	
INTERO	RE1	168.3	7.88	16 giri
CAROTATO	RE1	130.2	6.32	
INTERO	RE2	168.1	8.32	13 giri
CAROTATO	RE2	130.5	6.87	
INTERO	RE3	168.3	7.91	14 giri
CAROTATO	RE3	128.7	6.69	
INTERO	RE4	168.7	8.10	13 giri
CAROTATO	RE4	130.0	6.70	
INTERO	RE5	168.4	8.32	14 giri
CAROTATO	RE5	130.5	6.87	
INTERO	RE6	168.7	8.26	15 giri
CAROTATO	RE6	130.4	6.94	

Tabella 27 - Caratteristiche volumetriche provini MIX-RE per modulo dinamico e fatica

Come si può evincere dalla tabella, è stata rispettata la percentuale di compattazione prefissata del $6.5\% \pm 0.5\%$. Ai fini dei successivi test, quindi, i provini presentano caratteristiche volumetriche confrontabili. I provini contenenti RA non ringiovanito hanno avuto bisogno di un maggior numero di giri per essere compattati, a parità di altezza target.

Non è stato ritenuto conveniente analizzare le rette di lavorabilità dei provini in questione dato il basso numero di giri necessario per compattarli all'altezza desiderata.

PROVA DI RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA

Per quanto detto nei capitoli precedenti, questa prova restituisce in output una serie di coppie Forza-Spostamento tramite le quali si può indagare il comportamento del materiale nei dintorni della rottura.

La prova viene condotta in controllo di deformazione (50.8 mm/s) in modo tale da avere a disposizione anche le coppie post-rottura. Con tali dati è stato possibile effettuare

considerazioni anche sull'energia dissipata durante la prova tramite l'indice CT_{Index} , una sorta di indice di duttilità del materiale.

A seguire vengono riportati i valori di carico massimo P (kN), spostamento a rottura s (mm) e ITS (MPa) per i vari materiali. I provini testati a 20°C sono stati testati utilizzando la UTM-30, ciò ha permesso di ottenere delle curve Forza-Spostamento, come mostrato nel seguito. Si presentano alcune tabelle riassuntive della prova effettuata.

ID	Max P	s	ITS
(-)	(kN)	(mm)	(Mpa)
4v	22.77	1.68	1.96
5v	22.96	1.44	1.97
6v	21.73	1.80	1.86
Media	22.49	1.64	1.93
Dev. St.	0.66	0.18	0.06

ID	Max P	s	ITS
(-)	(kN)	(mm)	(Mpa)
4ra	25.60	1.31	2.16
5ra	24.97	1.47	2.09
6ra	26.40	1.40	2.24
Media	25.66	1.39	2.16
Dev. St.	0.72	0.08	0.07

ID	Max P	s	ITS
(-)	(kN)	(mm)	(Mpa)
4re	24.70	1.39	2.08
5re	23.99	1.22	2.00
6re	24.15	1.21	2.03
Media	24.28	1.27	2.03
Dev. St.	0.37	0.10	0.04

Tabella 28 - Carico massimo, spostamento a rottura e ITS dei provini testati a 20°C

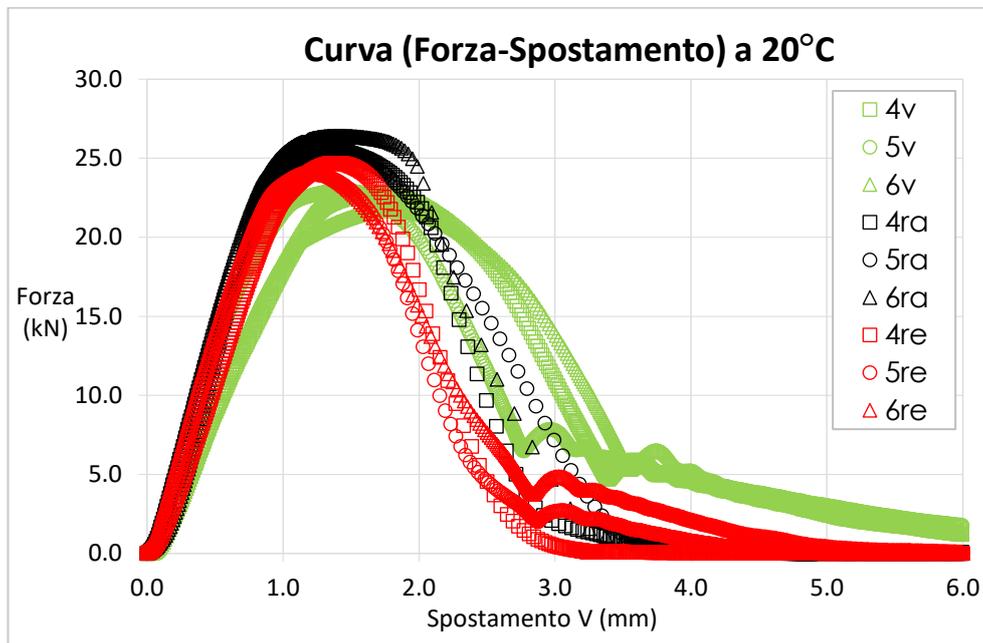


Figura 30 - Curva Forza-Spostamento per i provini testati a 20°C

Il grafico si presta ad alcuni spunti interessanti, sebbene le differenze non siano nette in tutti gli aspetti che si vanno ad analizzare. Si può notare come le curve relative agli stessi materiali tendano a raggrupparsi, segno del fatto che la prova discrimina in qualche misura i tre differenti materiali più di quanto faccia la variabilità dei provini all'interno della propria categoria di conglomerato bituminoso.

Il calcolo dei parametri ITS e CTI è utile ai fini del confronto numerico, ma alcune indicazioni sono evidenti dal grafico. Le curve di miscela con materiali vergini (4v, 5v, 6v) si presentano più basse e ampie, indice di una maggiore duttilità (funzione dell'area sottesa dalla curva). Inoltre queste presentano uno spostamento a rottura più alto.

Le curve di MIX-RA e le curve di MIX-RE si presentano più alte e ripide, quindi presenteranno verosimilmente una minor duttilità. Queste mostrano valori di carico a rottura attorno ai 25 MPa. Si ricorda che la UTM-30 ha una cella di carico che può imporre massimo 30 kN.

I provini testati a 4°C, per limiti strumentali della UTM-30, sono stati testati necessariamente con l'ausilio della pressa statica (max 50kN) poiché ci si aspettava valori più elevati di carico a rottura. Tuttavia la pressa statica ha un sistema di acquisizione punti meno efficace, il che ha portato a delle curve con troppi pochi punti per essere analizzate in modo significativo. Si è preferito plottare esclusivamente le coppie forza-spostamento a rottura, sulla base delle quali è ancora possibile valutare l'ITS. Di seguito si riportano le tabelle riassuntive a 4°C.

ID	Max P	s	ITS
(-)	(kN)	(mm)	(Mpa)
1v	-	-	-
2v	40.05	1.56	3.41
3v	42.42	2.25	3.71
Media	41.23	1.91	3.56
Dev. St.	1.67	0.49	0.21

ID	Max P	s	ITS
(-)	(kN)	(mm)	(Mpa)
1ra	-	-	-
2ra	41.16	1.51	3.49
3ra	51.63	1.05	4.38
Media	46.40	1.28	3.94
Dev. St.	7.40	0.33	0.63

ID	Max P	s	ITS
(-)	(kN)	(mm)	(Mpa)
1re	44.17	1.53	3.75
2re	44.19	1.85	3.74
3re	45.49	0.90	3.86
Media	44.62	1.42	3.78
Dev. St.	0.75	0.48	0.07

Tabella 29 - Carico massimo, spostamento a rottura e ITS dei provini testati a 4°C

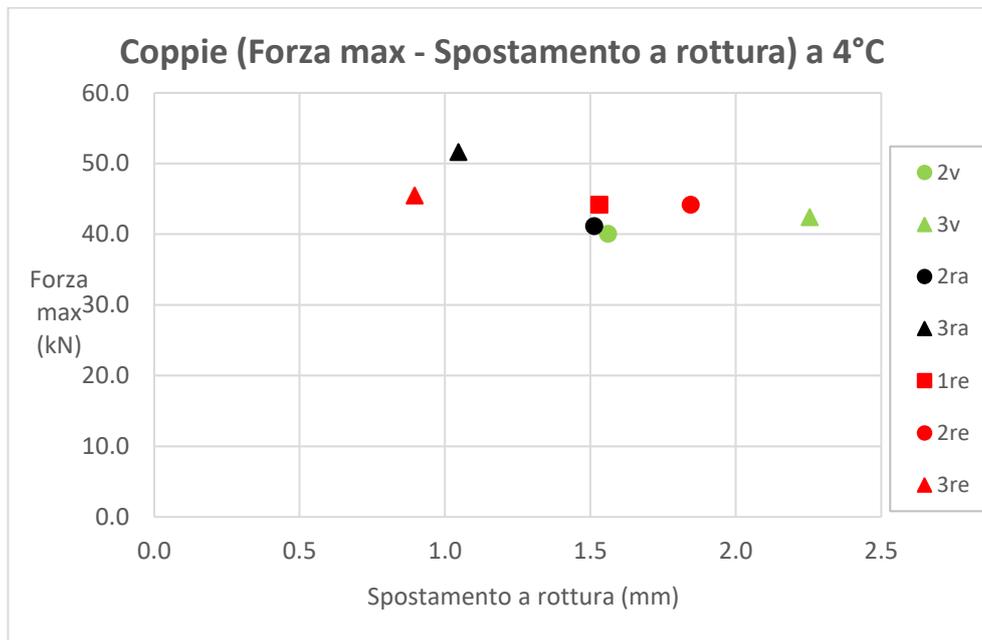


Figura 31 - Coppie Forza-spostamento dei provini testati a 4°C

Dal grafico e dalle tabelle si può notare come le dissimilitudini tra i valori di carico massimo siano talmente lievi da non essere rilevanti. Potrebbe sembrare interessante invece notare come lo spostamento medio a rottura della miscela MIX-V sia maggiore rispetto alle miscele MIX-RA e MIX-RE, ma tali valori sono accompagnati da una variabilità troppo alta.

Per ultimo, si vuole presentare il grafico dell'ITS mettendo a confronto i valori del test a 4°C e quelli a 20°C.

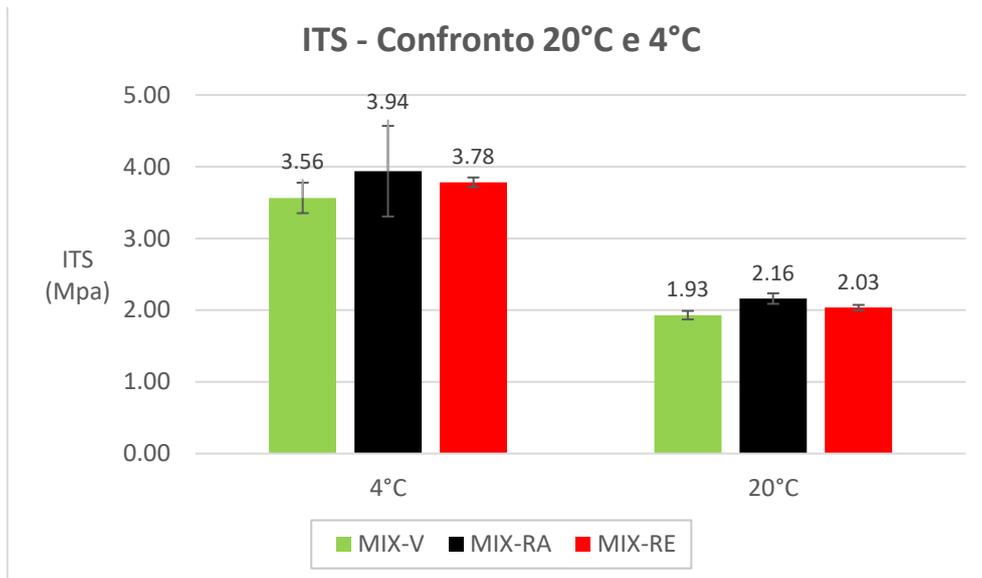


Figura 32 - Confronto valori di ITS per provini testati a 4°C e 20°C

Come ci si aspettava, i valori dell'ITS sono maggiori alle basse temperature. L'informazione principale che si evince dal confronto è che l'ITS è un parametro che, nelle miscele studiate, fa risaltare il contributo dello scheletro litico. In effetti non si apprezzano variazioni notevoli tra l'ITS delle miscele MIX-V, MIX-RA e MIX-RE, escluso l'effetto di scala dovuto alla temperatura. Osservando il grafico seguente si può capire meglio quanto detto.

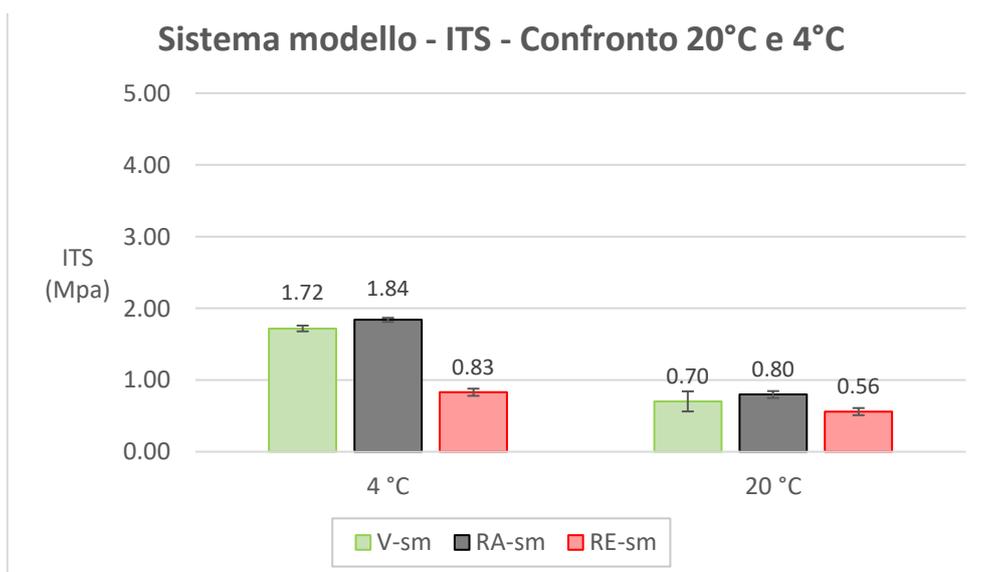


Figura 33 - Confronto valori di ITS per provini testati a 4°C e 20°C

Il grafico mostra i valori medi di ITS valutati in un precedente studio sul sistema modello. Sebbene le miscele siano diverse a livello compositivo, si può fare un raffronto sulla base del rapporto relativo che hanno: il V-sm è un provino di soli materiali vergini, il RA-sm è composto esclusivamente da RA, il RE-sm è RA ringiovanito con lo stesso rejuvenator utilizzato nel presente studio. L'analisi sul sistema modello mostra come il rejuvenator abbia permesso al RE-sm di non variare il suo ITS al variare della temperatura, cosa che non accade nei provini del MIX-RE.

In definitiva, in termini di ITS, alla scala di una miscela completa, la presenza dello scheletro litico è preponderante rispetto alle eventuali modifiche che avvengono nel mastice (bitume) al variare della temperatura.

Per valutare gli aspetti relativi alla duttilità delle miscele, è stato calcolato il Cracking Tolerance Index. Si hanno a disposizione solo i dati delle prove a 20° per quanto detto all'inizio di questa sezione.

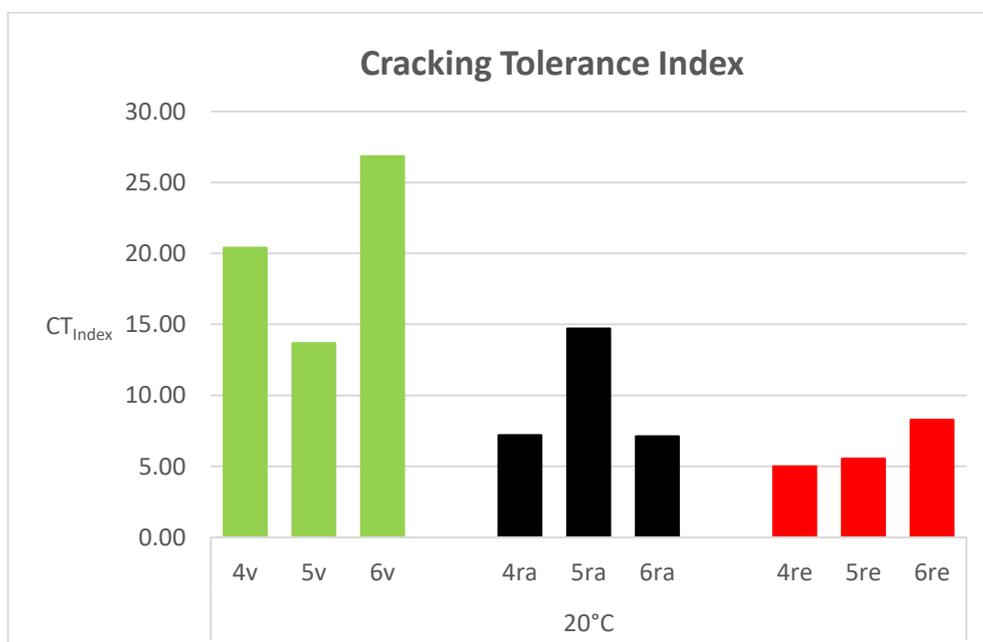


Figura 34 - CTI per provini testati a 20°C

	CT _{Index} @ 20°C		
	MIX-V	MIX-RA	MIX-RE
Media	20.31	9.68	6.28
Dev. St.	6.58	4.36	1.76

Tabella 30 - CTI medi per provini testati a 20°C

Il CTI è un parametro che valuta proprio quegli aspetti descritti all'inizio di questa sezione, tiene conto infatti dell'energia di frattura e della pendenza della curva nel tratto decrescente. E' a tutti gli effetti un parametro di duttilità.

Data l'elevata variabilità, i valori del MIX-RA e del MIX-RE sono confrontabili tra loro. Il MIX-V invece presenta un valore più elevato del CTI a dimostrazione del fatto che a 20°C, per le tre miscele, il carico massimo di rottura (direttamente proporzionale all'ITS) non varia, mentre la duttilità del MIX-V è maggiore. Con il calcolo dell'indice CTI, quindi, ci si svincola dagli effetti dello scheletro litico. Detto questo, si osserva che il MIX-RE non viene interessato dagli effetti del rejuvenator per ciò che concerne la sua duttilità ai 20°C quando sottoposto a rottura per trazione indiretta.

MODULO DINAMICO

Una buona metodologia di prova per valutare la rigidità di un conglomerato bituminoso a diverse temperature e frequenze di carico è la prova del modulo dinamico. Questa prova indaga il comportamento in campo viscoelastico e viene assunta nella pratica come metodologia ideale per la valutazione del dosaggio ottimale di rejuvenator.

La sollecitazione sinusoidale di compressione applicata normalmente alla faccia del provino cilindrico permette di ottenere dei valori di modulo dinamico che, opportunamente shiftati nel piano bilogaritmico ($f_r|E^*$) sfruttando il principio di sovrapposizione tempo-temperatura, permettono di computare le curve maestre del modulo dinamico e le curve relative alla fase del modulo complesso.

Le curve maestre, per come sono generate, sono approssimate da un modello che presenta un asintoto orizzontale alle alte temperature (basse frequenze) ed un asintoto orizzontale alle basse temperature (alte frequenze), in corrispondenza dei quali il comportamento della miscela è influenzato rispettivamente dallo scheletro solido e dalla rigidità del bitume.

Si presentano di seguito le curve maestre ottenute per 17 dei 18 provini realizzati (RE1 è stato scartato poiché non idoneo), 6 per ogni miscela.

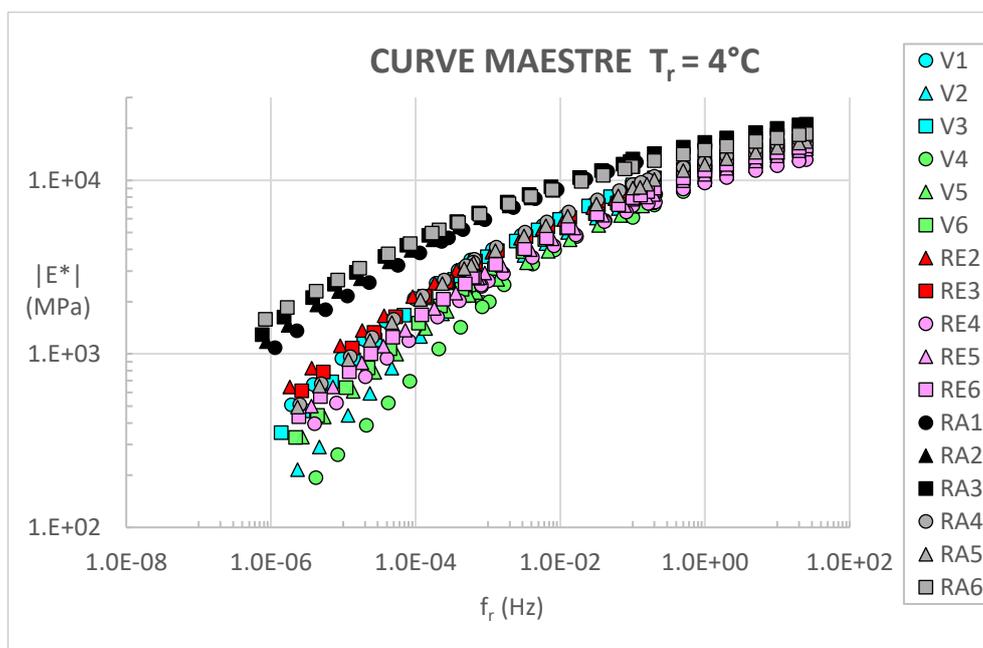


Figura 35 - Curve Maestre - Valori sperimentali

Le curve maestre sono state realizzate sulla base dei test a tre diverse temperature (4°C , 20°C , 40°C) e traslate sulla base della temperatura di riferimento di 4°C .

Dal grafico precedente si evidenzia un sostanziale abbassamento delle curve appartenenti al MIX-RE. Questa prova mette in evidenza il contributo del rejuvenator a

differenza di quanto non è risultato dalle prove di resistenza a trazione indiretta. L'additivo infatti esplica un'azione di softening del bitume contenuto nel RA e le curve del MIX-RE tendono ad avvicinarsi a quelle del MIX-V, anche se in differente misura alle diverse frequenze.

Si evince tuttavia un'elevata variabilità dei dati. Osservando le singole serie si nota che alcune di queste si sovrappongono in maniera accettabile quando si confrontano il MIX-RE ed il MIX-V. Ciò non vale per i valori medi, come si vede nei grafici che si mostrano nel seguito.

Le serie di punti del grafico precedente mostrano i valori dei moduli dinamici non ancora shiftati e questo lo si può notare osservando che a punti vicini di curve diverse corrispondono ascisse diverse. Per calcolare le medie e confrontare i valori sulle stesse ascisse è necessario effettuare la traslazione come già spiegato in precedenza. Si ottengono le seguenti curve maestre modellate:

	V	RA	RE
f_r	 E* 	 E* 	 E*
(Hz)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1.00E+02	17653	20670	17420
1.00E+01	14555	17786	14501
1.00E+00	11249	14630	11429
1.00E-01	8003	11379	8425
1.00E-02	5136	8271	5735
1.00E-03	2912	5555	3566
1.00E-04	1432	3416	2012
1.00E-05	605	1914	1031
1.00E-06	220	981	484

Tabella 31 - Valori numerici da modello delle curve maestre

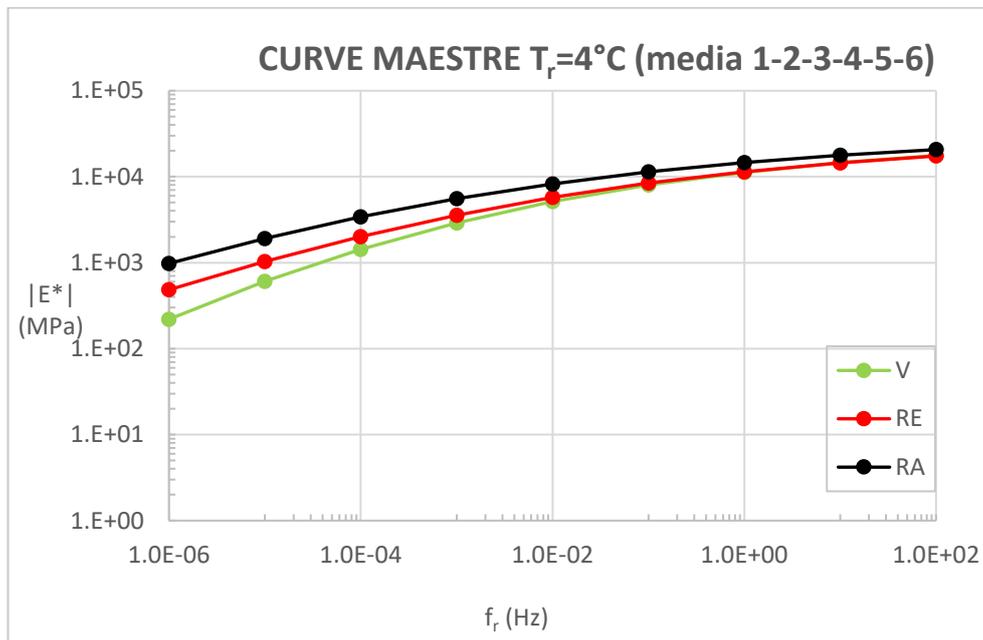


Figura 36 - Curve Maestre medie modellate

Nel grafico si sono riportate le curve limitatamente al dominio in ascissa analizzato tramite le prove di laboratorio. In quel campo il fitting dei valori sperimentali alla sigmoide modellata è pressoché perfetto, come è risultato dai valori molto prossimi all'unità della coefficiente R^2 in fase di calcolo.

La prima considerazione da fare riguardo alle curve maestre modellate è che i valori del MIX-RE e del MIX-V si sovrappongono bene alle alte frequenze (basse temperature) fino al valore di frequenza ridotta pari a 1×10^{-3} , oltre il quale l'andamento delle due curve inizia a divergere. Il dosaggio di rejuvenator dell'8% utilizzato non è sufficiente.

La curva del MIX-RA è più alta delle curve MIX-RE e MIX-V sia alle alte che alle basse frequenze. Ciò è dovuto evidentemente alla presenza di bitume invecchiato, poiché le miscele sono paragonabili in termini di scheletro litico e volumetria.

Nel grafico seguente si vogliono confrontare i risultati ottenuti in un precedente studio con il sistema modello.

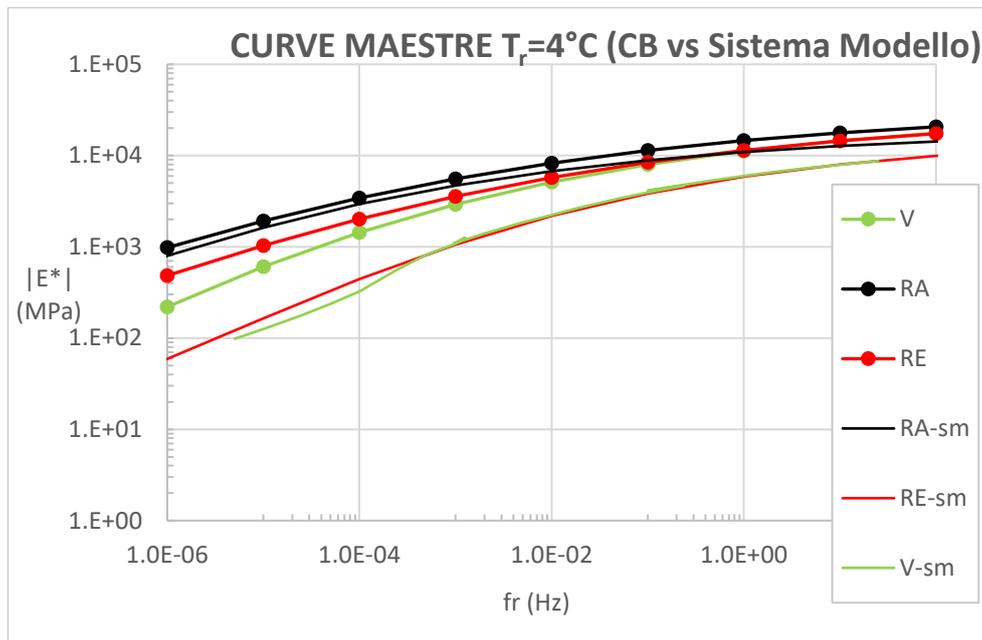


Figura 37 - Curve maestre medie modellate VS curve maestre sistema modello

Nel sistema modello l'8% di rejuvenator è bastato a ripristinare le caratteristiche del bitume invecchiato, come dimostra la perfetta sovrapposizione delle due curve V-sm e RE-sm. Bisogna specificare che la curva V-sm, per mancanza dei dati ricavati dallo studio precedente, è stata plottata utilizzando i dati sperimentali e non quelli modellati. E' evidente, quindi, quanto l'aver spostato lo studio sulla scala di una miscela completa abbia modificato la percentuale ottimale di rejuvenator.

FATICA

Come si è avuto modo di vedere nei capitoli precedenti, la prova di trazione monoassiale diretta ciclica costituisce un buon test per poter simulare le prestazioni del materiale sotto carichi da traffico, a meno di un fattore di scala. La prova è di tipo distruttivo e se ne valuta l'evoluzione del modulo complesso (in termini di modulo dinamico e angolo di fase) all'aumentare dei cicli di carico.

Il criterio di rottura utilizzato è quello del dimezzamento del modulo.

La prova è stata effettuata avendo impostato in input una deformazione target da picco a picco di 170 μ strain. Questa è intesa come la media delle deformazioni imposte dai tre Linear Variable Differential Transducer (LVDT), i quali possono applicare deformazioni anche maggiori di 170 μ strain se il materiale si presenta troppo eterogeneo e/o con difetti superficiali.

Per i 18 provini testati, i primi 9 sono stati esclusi a causa di alcune anomalie nel macchinario di prova. Dei 9 provini del secondo lotto, 3 sono pervenuti a rottura fragile quasi istantanea a causa di eterogeneità nel materiale e/o nella geometria del provino.

Si mostrano i grafici in scala semi-logaritmica riassuntivi delle prove effettuate.

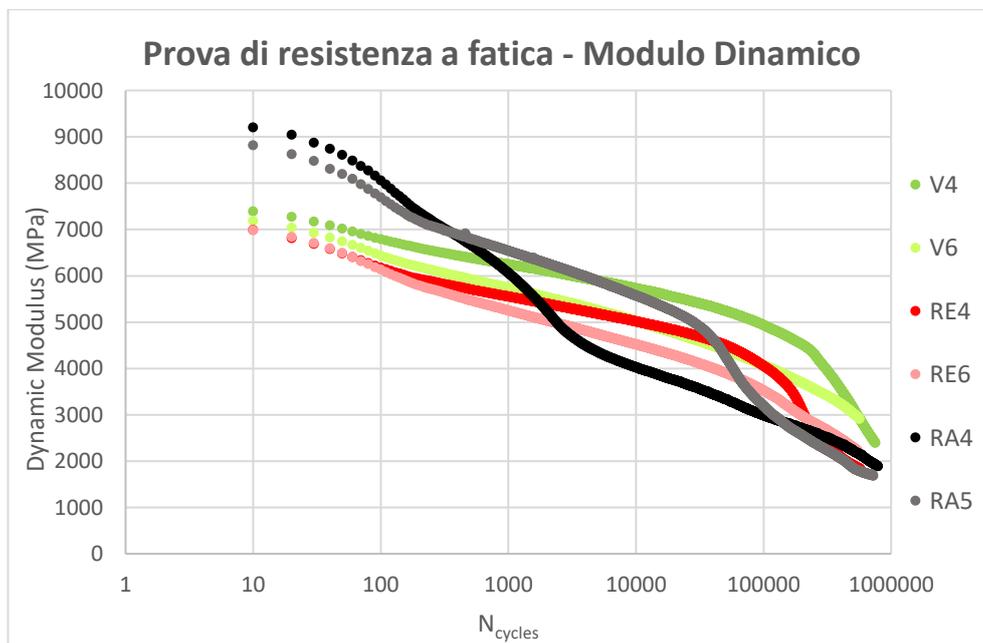


Figura 38 - Prova monoassiale a trazione diretta ciclica

Analizzando il grafico, si nota come prima cosa che i moduli iniziali (dopo i primi 10 giri) a 15°C e 10 Hz dei provini del MIX-V e del MIX-RE hanno valori di partenza simili tra loro,

mentre i moduli iniziali dei provini del MIX-RA sono molto più alti. Questo rispecchia quanto ci si aspetta riguardo al comportamento dei provini del MIX-RA che, essendo costituito al 50% da RA e al 50% da materiali vergini, mostra comportamento più rigido.

I provini del MIX-V e del MIX-RE presentano un trend quasi lineare finché non sopraggiunge il dimezzamento del modulo, dopodiché si ha un abbattimento repentino del modulo; evidenza, questa, che rafforza la scelta di tale criterio come criterio di rottura.

Al progredire dei cicli sia il provino RA4 che il provino RA5 presentano un decadimento del modulo più repentino di quanto non lo abbiano gli altri campioni; il RA5 però, attorno ai 300 cicli, inizia ad assumere un andamento meno ripido e più simile a quello degli altri provini. E' probabile che il primo tratto di decadimento sia dovuto alla presenza di un'asimmetria in corrispondenza della linea di uno dei tre traduttori che porta ad il macchinario a dover compensare nell'applicazione della deformazione in corrispondenza degli altri due trasduttori; in questo modo la AMPT cerca di mantenere costante il valore della deformazione media di 170 μ strain (valore scelto dall'operatore). Si può vedere il meccanismo nel seguente grafico.

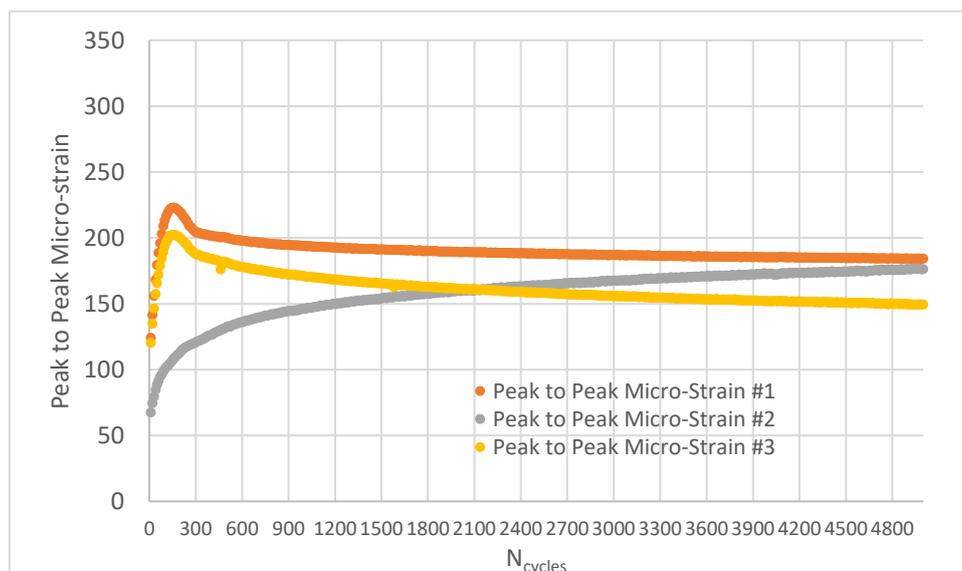


Figura 39 - Curve di deformazione picco-picco dei tre differenti trasduttori

In ogni caso, quello di calibrare inizialmente l'ampiezza della deformazione imposta a livello dei trasduttori è il modo previsto in cui la AMPT lavora; il problema, nel caso delle miscele contenenti RA non ringiovanito, è che la miscela è talmente fragile da lesionarsi in maniera rilevante già in tale circostanza; segue un decadimento repentino del modulo.

Si riassumono nella tabella seguente i valori di modulo di partenza, modulo al 50% e numero di cicli in corrispondenza del modulo al 50%, cioè alla rottura.

Prova a trazione diretta ciclica @ 15°C, 10Hz				
	 E* _{iniz}	 E* _{50%}	N_f	Deformazione target
	(Mpa)	(Mpa)	(-)	(με)
V4	7910.0	3955.0	316361.0	170
V6	7631.0	3815.5	161433.2	
RE4	7438.0	3719.0	142964.3	
RE6	7359.0	3679.5	77340.0	
RA4	9833.0	4916.5	2543.4	
RA5	9371.0	4685.5	38651.8	

Tabella 32 - Prova monoassiale a trazione diretta ciclica

Di seguito il grafico riassuntivo del numero di cicli a rottura per ogni provino testato con successo.

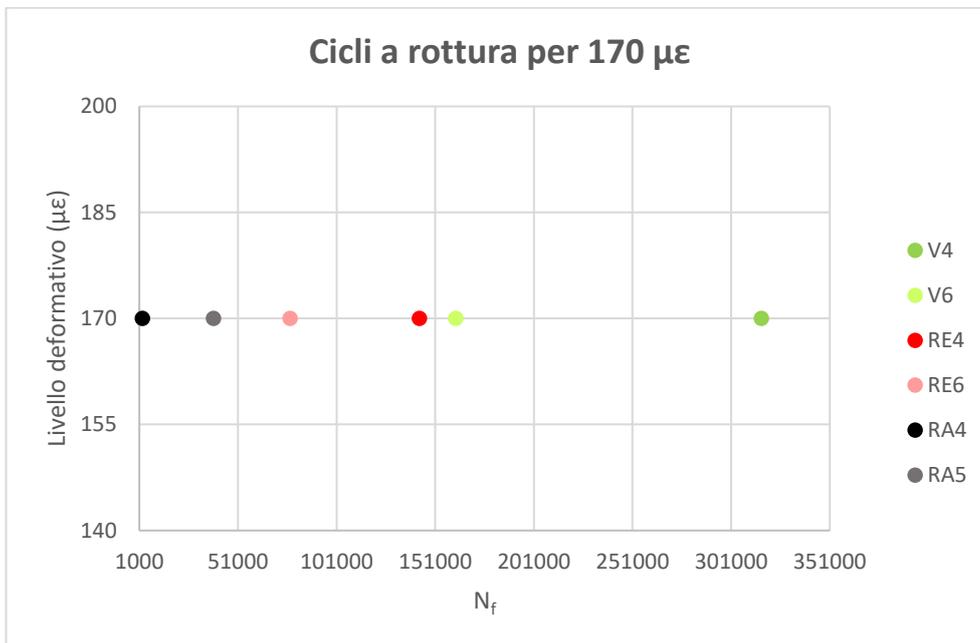


Figura 40 - Cicli a rottura per 170 microstrain

In tabella si elencano i valori medi dei cicli a rottura con il coefficiente di variazione, che rende l'idea di quali medie siano più significative.

	N_f medio	CV
	(-)	(%)
MIX-V	238897	46
MIX-RE	110152	42
MIX-RA	20598	124

Tabella 33 - Cicli a rottura per 170 microstrain (valori medi)

In effetti si manifesta il trend atteso, cioè il numero medio di cicli a rottura è maggiore per i campioni di MIX-V e minore per i campioni di MIX-RA; il MIX-RE si attesta nel mezzo. Le tre miscele hanno volumetria e scheletro litico confrontabili, quindi la differenza nelle

loro performance in questo tipo di test è da ascrivere essenzialmente alla presenza di bitume irrigidito, quindi molto fragile, nel RA.

Seppur il MIX-RA presenti un coefficiente di variazione molto elevato, non raggiunge il valore delle altre due miscele.

Il MIX-RE, infine, conferma ciò che era emerso dalle altre prove: il rejuvenator ha mostrato un'influenza nella resistenza a fatica, ma va testato con un nuovo dosaggio.

CONCLUSIONI

Con la finalità di realizzare una miscela innovativa che inglobi il 50% in peso di fresato bituminoso, si sono indagati gli effetti dell'applicazione di un additivo ringiovanente (rejuvenator) mettendo a confronto tre tipologie di miscela per strato di collegamento: MIX-V, MIX-RA, MIX-RE. La MIX-V è una miscela composta esclusivamente da materiali vergini, la MIX-RA è una miscela composta al 50% da aggregati e bitume vergini ed al 50% da fresato bituminoso (RA), mentre la MIX-RE è come la MIX-RA ma con l'aggiunta del rejuvenator.

Una prima fase della sperimentazione ha previsto il progetto della miscela vergine sulla base del metodo volumetrico (capitolato CIRS), a seguito di cui sono state progettate le due restanti miscele ponendo attenzione affinché si ottenesse stessa composizione granulometrica, stesso contenuto di bitume e stessa volumetria. In questo modo si è potuta effettuare un'analisi sperimentale in cui la miscela additivata potesse essere confrontata con una condizione ottimale (MIX-V) e con una condizione da migliorare (MIX-RA). Per la miscela additivata è stato ipotizzato un dosaggio di primo tentativo, eventualmente da modificare e testare in successivi studi, data l'onerosità dei procedimenti.

L'obiettivo della sperimentazione è stato perseguito avvalendosi di consolidate metodologie di prova. Sono stati analizzati gli aspetti volumetrici e di lavorabilità dei provini confezionati tramite pressa giratoria. È stata indagata la risposta dei materiali in campo viscoelastico lineare per valutare l'efficacia del rejuvenator e validare, eventualmente, il dosaggio di rigenerante di primo tentativo. Sono state effettuate prove distruttive per verificare il comportamento delle miscele nei dintorni della rottura; nella fattispecie i provini sono stati testati a rottura per trazione indiretta nella configurazione "brasiliiana" (alle medie e basse temperature) ed a rottura per fatica,

sollecitati da trazione ciclica monoassiale. In aggiunta, sono stati effettuati alcuni paragoni con i risultati di una sperimentazione precedente sul sistema modello, dove si erano indagate tre miscele equiparabili, con le dovute cautele, alle miscele oggetto di questo studio.

Volendo sintetizzare ciò che è emerso dalla sperimentazione, si può dire che:

1. La procedura di mix design ha portato con successo alla definizione di tre miscele aventi stessa struttura litica e percentuali dei vuoti della stesa entità; si è ottenuto un buon fitting della curva di progetto contenente il 50% di RA alla curva di progetto costituita da materiali vergini; in tal modo, si è potuto procedere alla sperimentazione a parità di scheletro solido e vuoti, in modo da poter discriminare eventuali effetti rilevanti sulla fase legante attraverso i successivi test;
2. Per ciò che concerne le caratteristiche di autoaddensamento (C1) e lavorabilità (k) delle tre miscele si è manifestata la maggior propensione della miscela MIX-V all'autoaddensamento, probabilmente grazie all'effetto lubrificante del bitume vergine alle alte temperature che ha permesso ai singoli inerti di superare l'attrito al contatto con altro inerte; di conseguenza la lavorabilità della miscela vergine è risultata minore rispetto a quella delle altre miscele poiché ad un elevato autoaddensamento iniziale corrisponde spesso una minor velocità di compattamento a parità di giri (provini compattati tutti a 100 giri). Un risultato peculiare lo si è riscontrato sulla miscela MIX-RE, poiché ha presentato valori di C1 e k paragonabili a quelli della miscela MIX-RA; ci si aspettava che il rejuvenator potesse avere una qualche influenza già a partire da questi due parametri;
3. Dalle prove di resistenza a trazione indiretta si è manifestata una pressoché totale uguaglianza tra i valori di ITS delle tre miscele, sia a 20°C che a 4°C; questo è comunque un risultato se confrontato con ciò che era accaduto nella sperimentazione sul sistema modello dove si era visto che il rejuvenator ha un

- effetto: permette al sistema modello ringiovanito di mantenere costante il proprio valore di ITS al variare della temperatura. Riportando il ragionamento alla scala della miscela completa si può dedurre che l'effetto della temperatura viene mascherato dalla presenza di uno scheletro litico ben assortito;
4. Sempre dalle prove di resistenza a trazione indiretta si può dimostrare come la miscela MIX-V abbia risposto con maggiore duttilità, seppur lieve, nel test a 20°C; la miscela MIX-RE non ha fatto altrettanto. Lo si evince dall'analisi speditiva delle curve a forza-spostamento e ciò trova conferma con il calcolo del CT_{Indez} , più elevato nel caso del MIX-V;
 5. Le prove di modulo dinamico hanno mostrato che l'effetto del rejuvenator c'è stato e lo si vede alle alte e medie frequenze, ma non vale lo stesso per le frequenze basse. Risulta dunque evidente che il dosaggio dell'8% di rejuvenator (su peso di bitume contenuto nel RAP) è un quantitativo discreto ma non sufficiente affinché si abbia stessa rigidità a tutte le frequenze di test. A confronto con il sistema modello, anche in questo caso la presenza di uno scheletro litico ben assortito ha rilevanza. In questo senso lo studio necessita di ulteriori approfondimenti;
 6. Per le curve di decadimento del modulo nelle prove di fatica (trazione monoassiale diretta ciclica) l'evidenza sperimentale mostra l'effetto del rejuvenator; assodato che il dosaggio ottimale di additivo non è stato raggiunto, si manifesta il trend atteso: il numero medio di cicli a rottura è maggiore per i campioni di MIX-V e minore per i campioni di MIX-RA, mentre il MIX-RE si attesta nel mezzo.

Quanto emerso dalle prove descritte ha portato ad un risultato soddisfacente che, data l'onerosità dell'analisi in questione, necessita di un ulteriore passo. E' stato mostrato che l'aggiunta di quel particolare prodotto ringiovanente è efficace nei confronti di alcuni aspetti prestazionali, mentre se ne è esclusa l'influenza su altri.

Si potrebbe indagare in futuro un diverso dosaggio di additivo, da validare con i metodi descritti, per valutarne gli effetti in termini prestazionali; si potrebbe inoltre estendere l'analisi della resistenza a fatica a diversi livelli di deformazione iniziale, in modo tale poter costruire le rette di fatica nel piano bilogarithmico ($\epsilon_{0,t} - N_f$); si potrebbe arrivare a studiare e definire, oltretutto, un protocollo sperimentale per la valutazione delle miscele ad alto contenuto di RA.

BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Li, W. Tang, X. Yu, H. Zhan, X. Wang, Z. Wang, «Laboratory investigation on blending process of reclaimed asphalt mixture», *Construction and Building Materials*, Volume 325, Elsevier, 2022.
- [2] R. Izaks, V. Haritonovs, I. Klasa, M. Zaumanis, «Hot Mix Asphalt With High RAP Content», 1st International Conference On Structural Integrity, Riga Technical University, Dept. of Roads and Bridges, *Procedia Engineering 114*, Elsevier, 2015.
- [3] T. Anil Pradyumna, Dr. P. K. Jain, «Use of RAP Stabilized by Hot Mix Recycling Agents in Bituminous Road Construction», 11th Transportation Planning and Implementation Methodologies for Developing Countries, TPMDC 2014, Mumbai, India, *Transportation Research Procedia 17*, Elsevier, 2016.
- [4] D. Wang, C. Riccardi, B. Jafari, A. C. Falchetto, M. P. Wistuba, «Investigation on the effect of high amount of Re-recycled RAP with Warm mix asphalt (WMA) technology», *Construction and Building Materials 312*, Elsevier, 2021.
- [5] C. Yang, J. Zhang, F. Yang, M Cheng, Y. Wang, S. Amirghanian, S. Wu, M. Wei, J. Xie, «Multi-scale performance evaluation and correlation analysis of blended asphalt and recycled asphalt mixtures incorporating high RAP content», *Journal of Cleaner Production 317*, Elsevier, 2016.
- [6] «Asphalt mix Design Methods», Asphalt Institute MS-2, 7th Edition, 2014.
- [7] G. Tebaldi, E. V. Dave, A. C. Falchetto, M. Hugener, D. Perraton, A. Grilli, D. Lo Presti, M. Pasetto, A. Loizos, K. Jenkins, A. Apeageyi, J. Grenfell, M. Bocci, «Recommendation of RILEM TC237-SIB: protocol for characterization of recycled asphalt (RA) materials for pavement applications», *materials and structures*, 2018.

- [8] M. Zaumanis, R. B. Mallick, L. Poulidakos, R. Frank, «Influence of six Rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures», *Construction and Building Materials* 71, Elsevier, 2014.
- [9] Z. Sotoodeh-Nia, N. Manke, R. C. Williams, E. W. Cochran, L. Porot, E. Chailleux, D. Lo Presti, A. J. del Barco Carrion, J. Blanc, «Effect of two novel bio-based rejuvenators on the performance of 50% RAP mixes – a statistical study on the complex modulus of asphalt binders and asphalt mixtures», *Road materials and Pavement Design*, 2019.
- [10] E. Bocci, E. Prosperi «Analysis of different reclaimed asphalt pavement to assess the potentiality of RILEM cohesion test», *materials and structures*, 2020.
- [11] E. Prosperi, E. Bocci, M. Bocci, «Evaluation rejuvenating effect of different additives on bituminous mixtures including hot-recycled RA as a function of the production temperature», Department of Construction, Civil Engineering and Architecture, Università Politecnica delle Marche, Ancona Italy; faculty of Engineering, eCampus University, Novedrate (CO), Italy, 2021.
- [12] I. L. Al-Qadi, M. Elseifi, S. H. Carpenter, A report of the findings of «ICT R27-11 Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP», *Reclaimed Asphalt Pavement – a literature review*, Illinois center for transportation, 2007.
- [13] T. B. Moghaddam, H. Baaj, «The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review», *Construction and Building Materials* 114, Elsevier, 2016.
- [14] D. Dalmazzo, L. Urbano, P.P. Riviera, E. Santagata, «Testing of reclaimed asphalt model systems for the evaluation of the effectiveness of rejuvenators», Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering, Politecnico di Torino, Italy, 2020.

[15] M. Boccia, A. Grilli, «Valutazione dell'influenza dell'additivo "Carbonxide 010/Lp" sulle Caratteristiche Meccaniche del Bitume e del Conglomerato Bituminoso», CIRS - Centro Interuniversitario sperimentale di Ricerca Stradale, progetto di ricerca 2007.

[16] F. A. Santagata, «Strade – Teoria e tecnica delle costruzioni stradali», Vol.1 – progettazione, Pearson Italia, 2016.

[17] P. Ferrari, F. Giannini, «Ingegneria stradale», Volume II – Corpo stradale e pavimentazioni, Isedi 1979, Mondadori 1983, Petrini 1984, UTET 1996, De Agostini 2007.

i. Bituminous mixtures – Test methods part 26: Stiffness BS EN 12697-26:2018. Tracked Changes Compares BS EN 12697-26:2018 with BS EN 12697-26:2012.

ii. AASHTO Designation: TP 107-18 "Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test".

iii. Bituminous mixtures – Test methods part 23: "Determination of indirect tensile strength of bituminous specimens BS EN 12697-23:2017. Tracked Changes Compares BS EN 12697-23:2017 with BS EN 12697-23:2003.

iv. AASHTO Designation: PP 61-13 "Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)".

v. AASHTO Designation: T 378-17 "Determining the Dynamic Modulus and flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)".

vi. BSI Standards Publication "Tests for mechanical and physical properties of aggregates" parte 6: Determination of particle density and water absorption BS EN 1097-6:2013.

vii. BSI Standards Publication, Bituminous mixtures – Test methods part 5:
Determination of the maximum density BS EN 12697-5:2018.