



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Analisi sperimentale mediante approccio VECD di un tronco pilota
autostradale realizzato con miscele bituminose confezionate con tecnologia
tiepida

VECD analysis of a motorway pavement section built with full-depth hot and
warm asphalt mixtures

Relatore:

Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di Laurea di:

Eugenio Mariani

Correlatore:

Dott. Ing. Lorenzo Paolo Ingrassia

A.A. 2020 / 2021

Sommario

Capitolo 1 – Introduzione	4
Capitolo 2 – Stato dell’arte	6
2.1 La pavimentazione stradale	6
2.2 Il Warm Mix Asphalt.....	7
2.2.1 Vantaggi del WMA	8
2.2.2 Svantaggi del WMA	8
2.2.3 Gli additivi.....	9
2.3 Risultati VECD applicato al WMA	10
Capitolo 3 – Indagine sperimentale	14
3.1 Stesa sperimentale e materiali	14
3.1.1 Carotaggio dei provini per le prove di modulo e fatica.....	18
3.2 Metodi di prova	20
3.2.1 Estrazione del bitume	20
3.2.2 Setacciatura.....	23
3.2.3 Picnometri.....	24
3.2.4 Contenuto di vuoti	28
3.3 Metodo S-VECD	30
3.3.1 Prova di modulo complesso.....	31
3.3.2 Prove di Fatica.....	40
Capitolo 4 – Risultati ed analisi.....	51
4.1 Caratterizzazione delle miscele	51
4.1.1 Percentuale di bitume	51
4.1.2 Analisi granulometrica	51
4.1.3 Contenuto di vuoti	54
4.2 Prove di modulo complesso.....	56
4.2.1 Ripetibilità delle prove di modulo	56
4.2.2 HMA Binder	67
4.2.3 WMA Binder	70
4.2.4 Confronto HMA – WMA Binder	73
4.2.5 HMA Base	75
4.2.6 WMA Base	79
4.2.7 Confronto HMA-WMA Base	83

4.3 Prove di fatica.....	85
4.3.1 HMA Binder.....	85
4.3.2 WMA Binder.....	87
4.3.3 Confronto HMA-WMA Binder.....	89
4.3.4 HMA Base.....	92
4.3.5 WMA Base.....	94
4.3.6 Confronto HMA-WMA Base.....	96
4.4 Valori dell'indice sintetico Sapp.....	98
Capitolo 5 – Conclusioni.....	100
Bibliografia.....	102

Capitolo 1 – Introduzione

Nel mondo attuale la salvaguardia dell'ambiente è una delle tematiche più trattate negli ambiti produttivi e sociali. Con l'avanzare dell'era *green*, il settore dell'ingegneria civile, specialmente quello nell'ambito stradale, si è applicato nella ricerca di lavorazioni e materiali più sostenibili e rispettosi degli attuali Criteri Minimi Ambientali (CAM). Negli ultimi anni per ridurre l'impatto ambientale e migliorare la qualità del lavoro degli operai durante la compattazione delle pavimentazioni stradali, sono state sperimentate nuove tecnologie in sostituzione del classico conglomerato bituminoso prodotto a caldo.

Una delle tecniche più promettenti è quella del Warm Mix Asphalt, le cosiddette tecniche tiepide, che grazie alle minori temperature di compattazione (i.e. -20-60 °C rispetto il caldo) offrono anzitutto la possibilità di ridurre le emissioni di inquinanti e di utilizzare un'alta percentuale di fresato, a cui si aggiungono numerosi vantaggi in termini operativi ed economici.

D'altronde, tali aspetti positivi durante le fasi di produzione e costruzione non possono pregiudicare la qualità e la durevolezza della miscela. Dovendo rispettare i limiti prescritti da capitolato per pavimentazioni flessibili indipendentemente dalla tecnologia di produzione utilizzata, le miscele vanno sottoposte a verifiche e prove di laboratorio al fine di valutarne le caratteristiche prestazioni durante la vita in esercizio.

Le tecniche tiepide sono una tecnologia innovativa, e la valutazione delle prestazioni in esercizio è di fondamentale importanza. Inoltre, considerando che tale tecnologia è studiata ed applicata da ormai un decennio, è possibile osservare ed analizzare le prestazioni in opera di pavimentazioni con strato di conglomerato a tiepido.

In tal proposito, lo studio oggetto di questa tesi di laurea è volto a valutare la rigidità e la resistenza a fatica di provini provenienti da carote estratte da una stesa sperimentale costruita nell'anno 2016. Tale ricerca rientra nel Progetto di Ricerca ERA: Extreme Recycling of Asphalt (Una "Best Practice" di Circular Economy e Sostenibilità nel settore dell'Ingegneria Stradale) i cui partners sono l'azienda *Pavimental S.p.A.*, l'*Università Politecnica delle Marche* e *Autostrade per l'Italia*, gestore della rete. Lo studio è stato condotto applicando un metodo innovativo, chiamato S-VECD (Simplified-Viscoelastic Continuum Damage) per la determinazione di indici per la valutazione della resistenza del materiale. Quest'ultimo permette di cogliere la capacità di accumulare deformazioni prima della rottura, che è di fondamentale importanza per un materiale, valutando proprietà significative come la rigidità, la resistenza al danno (propagazione delle fessure), la tenacità e il comportamento a rottura. Infine, il metodo S-VECD definisce un indice sintetico (Sapp) in grado di racchiudere tali aspetti, utile per il confronto diretto con altre miscele.

Al fine di identificare i vantaggi e gli svantaggi del Warm Mix Asphalt rispetto i conglomerati tradizionali, la caratterizzazione prestazionale degli strati di collegamento e base della sezione realizzata con tecnologia tiepida è stata confrontata con quella della sezione realizzata con tecnologia a caldo modificata con polimeri, di uso comune in ambito autostradale.

Per raggiungere gli scopi sopra citati è stato necessario prima conoscere le proprietà della miscela di conglomerato, effettuando prove di caratterizzazione per conoscerne la granulometria, massa volumica, percentuale di bitume. A seguire, determinati i contenuti di vuoti delle carote, i provini sono stati testati mediante prove di modulo dinamico e successivamente con prove cicliche di rotture a fatica in configurazione di trazione diretta.

L'indagine sperimentale svolta è descritta analiticamente in questo lavoro di tesi che è articolato nei seguenti capitoli:

- Capitolo 2 – Stato dell'arte:

Descrive in modo generale la pavimentazione stradale, le sue caratteristiche prestazionali e funzionali con particolare attenzione alla tecnologia WMA, andando ad osservare studi pregressi trattanti lo stesso argomento.

- Capitolo 3 – Indagine Sperimentale:

Descrive in modo approfondito le attrezzature ed i metodi utilizzati per questa sperimentazione.

- Capitolo 4 – Risultati ed analisi:

Vengono riportati i risultati ottenuti dalla sperimentazione commentando le differenze tra WMA e HMA.

- Capitolo 5 – Conclusioni:

Propone una sintesi complessiva dei risultati acquisiti in relazione agli obiettivi prefissati all'inizio della sperimentazione.

Capitolo 2 – Stato dell'arte

2.1 La pavimentazione stradale

La pavimentazione è per definizione una sovrastruttura sovrastante il terreno, atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, con lo scopo di assolvere a diverse funzioni:

1. Garantire una circolazione confortevole e sicura, ovvero la pavimentazione deve avere caratteristiche superficiali di regolarità e aderenza;
2. Trasferire i carichi trasmessi dalle ruote veicolari in profondità, così da distribuire il carico e permettere all'intero pacchetto stradale di resistere ad un elevato numero di passaggi, il più a lungo possibile;
3. Proteggere la pavimentazione e il terreno sottostante dagli agenti atmosferici come acqua e ghiaccio, pericolosi per la stabilità del piano viabile.

Una pavimentazione stradale può essere classificata in base al tipo di materiale impiegato per la sua realizzazione, distinguendosi in rigide, semirigide e flessibili.

Una pavimentazione rigida prevede l'utilizzo di materiale cementizio sottoforma di lastre di calcestruzzo poste sopra ad uno strato di misto granulare o eventualmente di misto granulare e misto cementato. Per le pavimentazioni semirigide il materiale cementizio viene utilizzato solo negli strati più profondi, avendo una fondazione in misto granulare, una base in misto cementato ed infine strati di base binder ed usura in conglomerato bituminoso. Una pavimentazione flessibile, oggetto delle attività descritte nel presente studio è composta generalmente da quattro strati [Figura 1]:

1. Strato di usura, o tappeto (spessore di 4/6 cm): è lo strato della pavimentazione più superficiale a diretto contatto con gli pneumatici. Su di esso vengono applicati direttamente i carichi del traffico veicolare e il suo principale scopo è quello di garantire un confort ed una sicurezza di marcia. È realizzato in conglomerato bituminoso (i.e. aggregati lapidei + legante bituminoso) che, a seconda della funzione può essere chiuso, semichiuso o aperto, in funzione della percentuale di vuoti che caratterizza lo strato. Ovviamente uno strato di usura chiuso o semi chiuso ha delle prestazioni meccaniche superiori rispetto ad uno aperto, quest'ultimo viene però utilizzato per la realizzazione di tappeti drenanti, che hanno la capacità di drenare l'acqua al loro interno e aumentare così l'aderenza tra pneumatico e pavimentazione. Gli aggregati della miscela possiedono elevate caratteristiche di aderenza, rugosità e resistenza alle azioni tangenziali (i.e. aggregati di natura silicea o basalti).
2. Strato di collegamento (binder) (spessore di 6/8 cm): come suggerisce il nome, questo strato ha lo scopo di collegare il tappeto di usura con la base, trasferendo i carichi superficiali agli strati più profondi. Assume in aggiunta una funzione costruttiva, in quanto corregge eventuali discostamenti dalla planarità degli strati sottostanti. Fornisce inoltre un contributo per assorbire le azioni flessionali indotte dai carichi. È generalmente realizzato in conglomerato bituminoso chiuso o semichiuso.

3. Strato di base (spessore di 12/30 cm): ha il compito di assorbire le sollecitazioni flessionali indotte dai carichi. Per questo motivo ha lo spessore variabile, dipendentemente dalle caratteristiche del sottofondo, dal clima e dalla quantità di traffico previsto. Viene realizzato in conglomerato bituminoso con una dimensione massima degli aggregati maggiore e una percentuale di bitume minore rispetto agli strati superiori. Nelle pavimentazioni semirigide viene realizzato in misto cementato. Nel caso in cui la richiesta di resistenza a trazione sia bassa, si può adottare una base non legata in misto granulare.
4. Strato di fondazione (spessore di 15/35 cm): ha il compito principale di trasferire i carichi al sottofondo. Viene generalmente realizzato in misto granulare, quindi non legato, ma nelle pavimentazioni semi rigide può essere anche in misto cementato (legato).

Questa appena descritta è la tipica sovrastruttura stradale. Quest'ultima a sua volta è posta sopra un altro strato, il sottofondo, che costituisce il piano di posa della sovrastruttura stradale. Il suo spessore varia dai 50 ai 100 cm, a seconda che la sezione stradale sia in trincea o in rilevato. Lo scopo è quello di garantire un'adeguata portanza, determinante per la stabilità dell'intera pavimentazione: infatti, una mancanza di portanza può causare una perdita di funzionalità e conseguentemente ad una rapida diminuzione della vita utile.

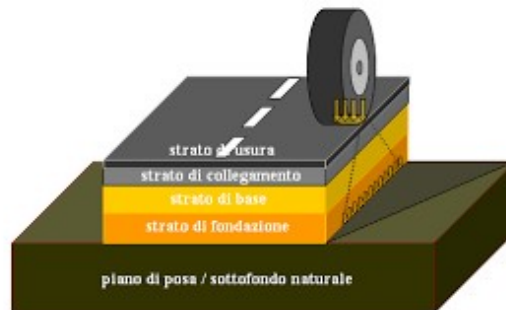


Figura 1- Sovrastruttura stradale

2.2 Il Warm Mix Asphalt

Negli ultimi anni il settore delle costruzioni stradali si è impegnato per la ricerca di nuove tecnologie da impiegare nella realizzazione delle pavimentazioni atte a migliorare le performance del materiale usato e l'efficienza delle opere, e nello stesso tempo, di preservare le risorse e diminuire le emissioni di inquinanti. Uno degli approcci che può contribuire al raggiungimento di questi obiettivi è quello di andare a diminuire la temperatura di produzione dei conglomerati bituminosi, di cui si compone la sovrastruttura. La miscela che ne risulta prende il nome di WMA (Warm Mix Asphalt), ovvero "conglomerato bituminoso tiepido".

La riduzione della temperatura negli WMA (i.e. 30% in meno rispetto a conglomerati a caldo) riduce la lavorabilità del composto. Il recente sviluppo tecnologico ha permesso di ovviare a questo problema, andando ad utilizzare additivi chimici, additivi organici o processi a base d'acqua o schiumati; tali tecnologie, anche se differenti, hanno lo stesso

scopo, cioè quello di ridurre la viscosità del bitume e migliorare la lavorabilità del conglomerato bituminoso a temperature più basse (i.e. 120 °C).

2.2.1 Vantaggi del WMA

I vantaggi di questa tecnologia sono molteplici:

1. Diminuendo la temperatura di miscelazione si ottiene una riduzione dell'inquinamento atmosferico (i.e. fumi ed emissioni);
2. Miglioramento delle condizioni di lavoro grazie alla minor emissione di gas nocivi;
3. Dovendo miscelare ad una temperatura più bassa, ne consegue una riduzione dei costi di produzione, grazie ad un minor consumo di energia;
4. Possibilità di inserire degli impianti nelle vicinanze di centri urbani;
5. Miscelando alla temperatura di un conglomerato bituminoso tradizionale, si ha la possibilità di raggiungere tramite il trasporto distanze più elevate;
6. Temperature ambientali troppo rigide, non permettono la stesa e la compattazione di una miscela tradizionale, ma grazie all'aggiunta di additivi e l'utilizzo della tecnologia tiepida è possibile avere un conglomerato bituminoso sempre lavorabile;
7. Possibilità di velocizzare le riaperture al traffico avendo tempi di raffreddamento ridotti;
8. Miglior lavorabilità e miglior compattazione grazie agli additivi;
9. Riduzione dell'invecchiamento del bitume con possibilità di andare ad inserire più fresato stradale.

2.2.2 Svantaggi del WMA

Tale tecnologia presenta d'altronde anche alcuni svantaggi:

1. A causa del ridotto invecchiamento si avrà una maggior suscettività alle deformazioni permanenti;
2. I costi energetici risparmiati devono essere paragonati al costo degli additivi;
3. È necessaria una modifica negli impianti di miscelazione per l'inserimento di additivi.

2.2.3 Gli additivi

Il Warm Mix Asphalt necessita l'utilizzo di additivi o particolari processi che ne migliorano la lavorabilità e permettono la diminuzione della temperatura di miscelazione e compattazione. Le alternative sono le seguenti.

1. *Additivi organici.* Per diminuire la temperatura di miscelazione e la compattazione del conglomerato bituminoso, si possono adoperare gli additivi organici e cere. Quando la temperatura di miscelazione supera quella di fusione delle cere, solitamente vi è una diminuzione della viscosità. Una volta raffreddata la miscela, le cere si dispongono omogeneamente nel composto sotto forma di particelle microscopiche provocando l'aumento di rigidità del legante. La scelta del tipo di cera da utilizzare deve essere accurata: una cera con temperatura di fusione più bassa della temperatura di esercizio della miscela comporta delle complicazioni; infatti, le cere dovrebbero essere resistenti e solide a queste temperature. Il tipo di cera giusta minimizza il comportamento del conglomerato a diventare fragile alle basse temperature. Le cere sono costituite da lunghe catene di idrocarburi con punto di fusione tra gli 80°C e i 120°C, la lunghezza delle catene è strettamente dipendente alla loro temperatura di fusione. Esse, aggiunte con una quantità che varia dal 2 al 4% del volume totale della miscela, sono in grado di modificare le proprietà del bitume portandolo ad avere un incremento della resistenza alla deformazione permanente. Inoltre, permettono la riduzione della temperatura di produzione di 20/30 °C. Questi additivi possono essere aggiunti direttamente alla miscela, ottenendo una riduzione della temperatura di lavorazione e un calo delle emissioni e tempi di produzione.
2. *Processi di schiumatura.* È la tecnologia più utilizzata negli Stati Uniti ed è basata sull'aggiunta di piccole quantità d'acqua che possono essere iniettate direttamente nel bitume caldo oppure nella camera di miscelazione con l'inerte. L'acqua a contatto con il bitume caldo evapora; il vapore, intrappolato, genera la schiuma che contemporaneamente aumenta il volume del legante riducendo così la viscosità della miscela. Con questa tecnica si aumenta notevolmente il rivestimento dei grani e la lavorabilità della miscela, il dosaggio di acqua deve essere ponderato ne consegue la durata dell'effetto. È possibile replicare il processo alla base di questa tecnica con due metodi differenti: utilizzando tecnologie contenenti acqua oppure tecnologie a base d'acqua. Quest'ultima sfrutta l'iniezione con degli appositi ugelli dell'acqua nel legante caldo. In questa maniera si produce una grande quantità di schiuma a causa dell'evaporazione dell'acqua che collassa velocemente. Le tecnologie contenenti acqua utilizzano la zeolite sintetica per produrre l'effetto schiumatura. Questa sostanza è composta da alluminosilicati di metalli alcalini ed è stata cristallizzata idrotermicamente. Con l'aumentare della temperatura gli zeoliti rilasciano acqua contenuta al loro interno grazie alla cristallizzazione. Un processo con una produzione di schiuma controllato può durare sino a 6-7 ore, provocando un leggero aumento del volume della miscela e una maggior lavorabilità. La zeolite può essere utilizzata con legante vergine o modificato, con conglomerato riciclato, con aggregati minerali e filler.

3. *Additivi chimici.* Le cere sono uno degli additivi di qualità da inserire nelle miscele tipicamente usate in Italia, ma sono molto costose. Si cerca quindi un'alternativa più economica: gli additivi chimici rappresentano un compromesso ottimo poiché non è necessaria alcuna modifica dell'impianto di produzione. Al contrario delle cere gli additivi chimici non modificano la viscosità del legante. Sono infatti dei tensioattivi che lavorano sull'interfaccia aggregato-bitume, regolando e riducendo le forze di attrito presenti, in un intervallo di temperatura compreso tra gli 85 e i 140°C. Viene pertanto notevolmente migliorata la capacità di rivestimento del bitume sugli aggregati, diminuendo la temperatura di produzione di 20-30 °C rispetto alle miscele tradizionali.

2.3 Risultati VECD applicato al WMA

Il metodo VECD è stato applicato alle miscele tiepide già nel 2017 da Dahae Kim et al. [1], in una sperimentazione volta a valutare i benefici di diversi additivi e anche l'effetto del RAP.

Lo studio era finalizzato allo studio delle prestazioni del WMA steso in un tronco sperimentale a Manitoba, Canada, tramite prove di laboratorio e valutazione dei dissesti in sito. In questo articolo viene applicato il metodo S-VECD, metodo sperimentale per la determinazione del comportamento di un materiale in campo visco-elastico lineare. Il metodo utilizzato non rispecchia esattamente quello utilizzato nella presente tesi; infatti, utilizza un diverso criterio di rottura, sfruttando il parametro G^R , mentre nello studio di questa tesi si utilizza il parametro D_R . Lo studio comprendeva prove di modulo dinamico, prove di fatica a trazione diretta e prove di ormaiamento. I risultati di tali prove sono stati infine utilizzati come input per le simulazioni della vita in esercizio tramite il software FlexPAVE.

Sono state studiate varie miscele differenti per l'additivo, contenuti di RAP e strati di utilizzo [Tabella 1].

Project	Mix	NMAS (mm)	Additive	RAP Content (%)	Binder Grade	Layer	Air Voids (%)		Compaction temp (°C)
							Fatigue	Rutting	
WMA	W-C1	16	-	-	PG 58-28	Surface	3.9	6.1	129
	W-C2		-	35	PG 58-28	Bottom	4.8	5.5	139
	W-S1		Sasobit	-	PG 58-28	Surface	3.2	5.2	106
	W-S2		Sasobit	35	PG 58-28	Bottom	4.9	5.5	118
	W-E1		Evotherm	-	PG 58-28	Surface	3.8	5.9	106
	W-E2		Evotherm	35	PG 58-28	Bottom	5.4	6.1	117
	W-A1		Advera	-	PG 58-28	Surface	3.0	4.7	108
	W-A2		Advera	35	PG 58-28	Bottom	5.4	6.1	106
	RAP		R-C	16	-	-	PG 58-28	Surface	5.4
R-15R		-	15		PG 58-28	Surface	5.9	6.4	134
R-50R		-	50		PG 58-28	Surface/Bottom	5.2	7.6	134
R-50RSB		-	50		PG 52-34	Surface	5.7	7.4	129

Tabella 1 - Sommario delle diverse miscele utilizzate nella sperimentazione [1]

I provini testati avevano differente geometria. Infatti, sono stati testati provini di diametro pari a 100mm a modulo e fatica, ed è stata utilizzato l'AMPT, proprio come avviene per la sperimentazione della presente tesi.

In conclusione, secondo questo studio, l'aggiunta di additivi nelle miscele WMA non porta a significativi cambiamenti ai valori di modulo dinamico rispetto alla miscela a caldo.

Diversamente, l'aggiunta di RAP (MIT-R-50 contengono in 50%) sembra rendere più rigide le miscele tiepide a causa della presenza di bitume invecchiato all'interno [Figura 2].

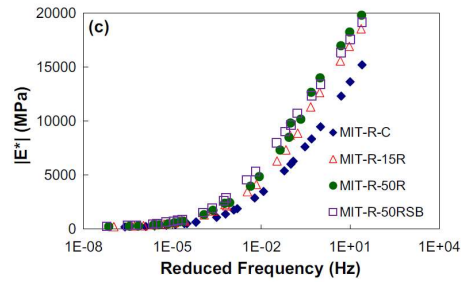


Figura 2 – Moduli dinamici sperimentali di miscele a tiepido con diversi contenuti di RAP

In generale, il RAP, specialmente per percentuali elevate di utilizzo, nelle miscele HMA abbassa la resistenza a fatica della pavimentazione, probabilmente a causa dell'invecchiamento del bitume e dell'aumento della rigidità nella miscela. Al contrario emerge dalla sperimentazione che le miscele WMA con all'interno del RAP siano più resistenti a fatica.

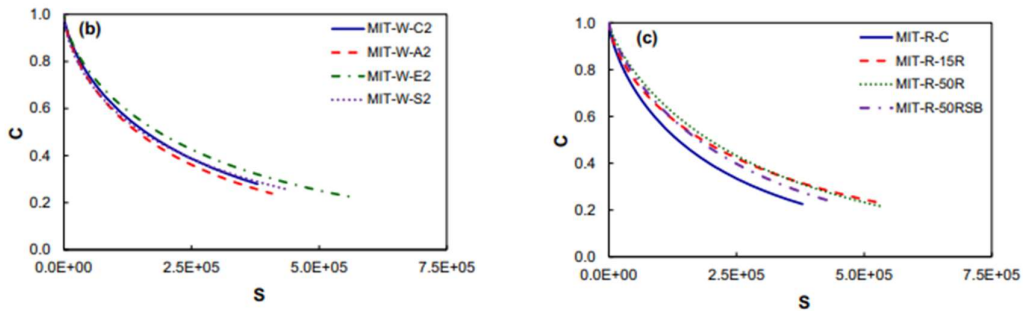


Figura 3 - Curva C-S strato WMA intermedio (sinistra), miscele con alti contenuti di RAP (destra)

Infatti, la miscela tiepida studiata nell'articolo [1] utilizzando un particolare tipo di additivo (MIT-W-E2, con additivo Evotherm) ha una curva C-S [Figura 3] che raggiunge alti valori di S rispetto alle altre: alcuni additivi sono in grado di incrementare la resistenza alla fessurazione promuovendo l'adesione tra bitume ed aggregato nonostante la minore temperatura di produzione.

Nel grafico a destra di Figura 3 è possibile notare come le curve C-S delle miscele con contenuto di RAP pari al 50% (MIT-R-50R – MIT-R-50RSB) siano più lunghe o del tutto confrontabili rispetto alle altre due miscele senza contenuto di RAP (MIT-R-C) o presente al 15% (MIT-R-15R), sottolineando la possibilità di incorporare esigue quantità di fessato senza inficiare sulla resistenza a fatica.

Sono state effettuate anche prove di ormaiamento, (TSS-Triaxial Stress Sweep), da cui è emerso che le miscele con i diversi tipi di additivi hanno sostanzialmente comportamenti confrontabili ma caratterizzati da alte deformazioni permanenti. È quindi sconsigliato l'uso di miscele tiepide come strati superficiali, specialmente in zone soggette a climi caldi.

Confrontando la performance di stesse miscele tiepide per strati di base con differenti additivi [Figura 4] si osserva che alcuni additivi sono in grado di mitigare il dissesto dell'ormaiamento meglio di altri. Nel caso specifico, la miscela S2 (con additivo Sasobit) ha il miglior comportamento, poiché la percentuale di deformazione permanente a lungo termine è minore e pari all'1.5%.

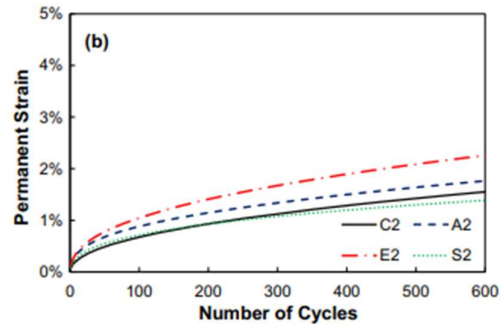


Figura 4-Deformazione permanente all'aumentare dei cicli di carico dalla prova TSS su miscele tiepide additate con 35% di RAP

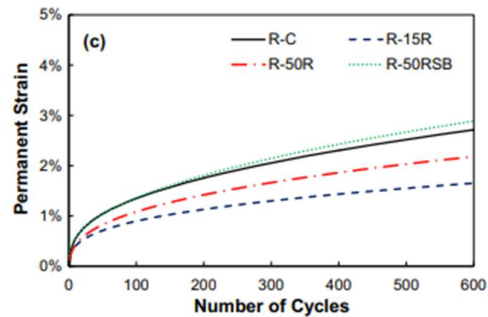


Figura 5- Deformazione permanente all'aumentare dei cicli di carico dalla prova TSS su miscele tiepide con 0% (R-C), 15% (R-15R), e 50% (R-50R) di RAP

Come illustrato nell'articolo [1], dai risultati delle prove TSS per l'ormaiamento, si ha che la miscela (S2) come è possibile osservare in [Figura 4] ha una deformazione permanente inferiore al resto delle miscele. Inoltre, va osservato in Figura 5 che la miscela senza RAP (R-C) ha una deformazione simile o maggiore rispetto alle miscele con aggiunta di RAP: le miscele con più contenuto di RAP (R-50R – R-50RSB) deformano più della corrispettiva miscela ma con il 15% di RAP (R-15R). Ciò significa che l'aggiunta di fresato non influisce sulle prestazioni.

D'altronde, va sottolineato che la resistenza alle deformazioni permanenti delle miscele tiepide valutata in sito non rispecchiava il comportamento in sito, dove dopo 3 anni di servizio la pavimentazione presentava ormaie di spessore massimo pari a 4mm.

Altri studi sono stati effettuati sulla teoria del S-VECD.

Nel 2019 è stato effettuato uno studio riguardante la valutazione del comportamento a fatica per miscele tiepide con aggregato riciclato [2].

Nello studio condotto da Flávio R. G. Padula et al. è stato analizzato il comportamento a fatica di diverse miscele con diverso contenuto di RAP, confrontando miscele HMA e WMA. Per la valutazione del comportamento a fatica è stata utilizzata la teoria del S-VECD.

Ai fini del confronto con il presente oggetto di tesi, le miscele di interesse studiate sono la miscela tradizionale a caldo contenente il 50% di aggregato riciclato e una miscela tiepida con la stessa percentuale di RAP (realizzata tramite processo di schiumatura).

In Figura 6 vengono mostrate le curve caratteristiche del danno C-S per tutti i materiali testati ottenute.

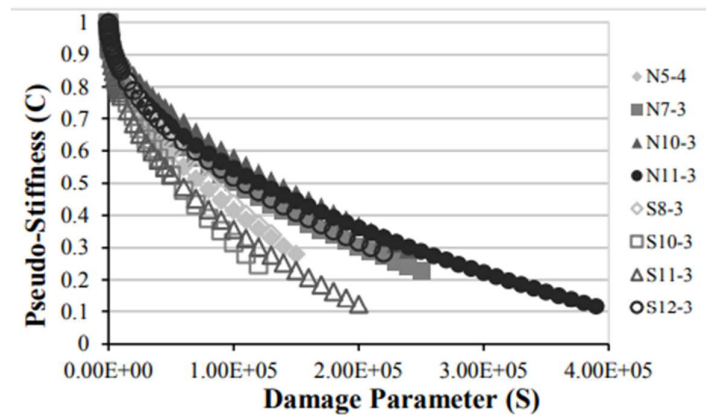


Figura 6 - curve C-S

È possibile osservare come tra le due miscele di interesse con il 50% di RAP, indicate in figura come (N11-3 per il WMA) e (N10-3 per HMA) la miscela tiepida è caratterizzata da una lunghezza maggiore, raggiungendo valori doppi di danno S e minori valori di pseudorigidezza C. Tale andamento indica che ha un comportamento nettamente migliore a fatica rispetto la miscela di riferimento.

Concludendo, una miscela WMA con un alto contenuto di RAP all'interno ha un comportamento a fatica migliore rispetto ad una miscela HMA con lo stesso quantitativo di aggregato riciclato, grazie alle minori temperature di produzione che non ossidano ulteriormente il bitume presente nel fresato. Oltre ad un ottimo comportamento a fatica, la tecnologia WMA ha anche vantaggi dal punto di vista economico ed ambientale.

Capitolo 3 – Indagine sperimentale

Il presente capitolo descrive in prima istanza le caratteristiche della stesa sperimentale costruita nel 2016 da cui sono state estratte le carote a dicembre 2021, poi vengono riportate le proprietà delle miscele da progetto. In seguito, vengono descritti i macchinari utilizzati, i protocolli di prova e le relative elaborazioni applicati per caratterizzare le miscele in oggetto.

3.1 Stesa sperimentale e materiali

Stesa sperimentale

La sperimentazione in laboratorio oggetto della presente tesi, si è svolta su provini ricavati da 6 carote, estratte da una stesa sperimentale in un segmento dell'Autostrada A1 nel tratto Orte-Fiano Romano (carreggiata sud). La stesa è stata effettuata nel 2016 successivamente al tentativo di produzione di conglomerati tiepidi in larga scala nel 2015 in un tratto dell'A14. Le sezioni di prelievo sono rispettivamente la sezione 2 per la miscela realizzata con tecnologia tiepida e la sezione 4 per la miscela a caldo di riferimento [Figura 7]. È stata effettuata una fresatura della pavimentazione esistente, per poi realizzare gli strati di nuovo conglomerato. Gli strati sono stati realizzati in due giorni consecutivi.

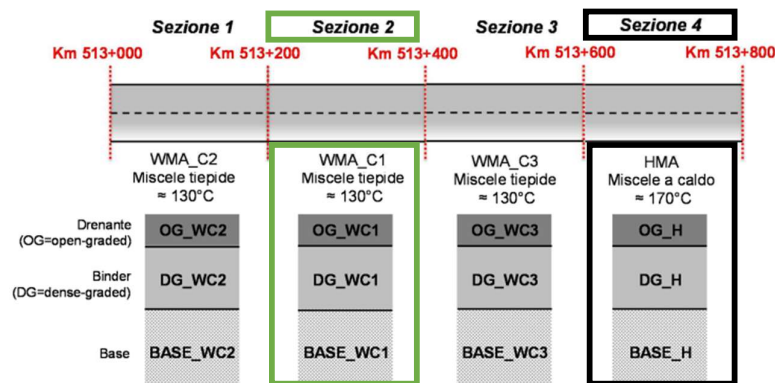


Figura 7 - Tronco sperimentale

La pavimentazione è composta da tre strati: uno strato di base da 15 cm, uno strato di collegamento di 10 cm ed infine uno strato di usura da 4 cm. Successivamente al carotaggio eseguito a dicembre del 2021, i campioni sono stati portati nel laboratorio di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell'Università Politecnica delle Marche per l'inizio della sperimentazione. Le carote sono state numerate da 1 a 3 per le miscele tiepide [Figura 8], da 4 a 6 per la miscela a caldo tradizionale [Figura 9].



Figura 8- Carote di prova 1-3 (WMA)



Figura 9 - Carote di prova 4-6 (HMA)

I conglomerati bituminosi

Le proprietà relative alle miscele, che si riportano nel presente paragrafo, sono state ricavate dalle schede tecniche fornite dal produttore e dai dati raccolti dalle precedenti sperimentazioni ricadenti nello stesso Progetto di Ricerca ERA.

Per ciascuno strato del pacchetto strutturale, le miscele studiate si differenziano per la tecnologia produttiva (temperature di lavorazione e aggiunta di additivi WMA) utilizzata nel confezionamento, ma sono tutte caratterizzate dallo stesso mix design (stessa curva granulometrica, stesso contenuto e tipologia di bitume vergine d'aggiunta, stesso contenuto di fresato).

I valori descritti sono poi stati verificati tramite caratterizzazione del materiale in laboratorio per confermare la qualità dei dati in possesso (§Sezione 4.1).

Aggregati vergini

La componente litica è la stessa per entrambe le miscele. Gli aggregati vergini utilizzati per la preparazione delle miscele destinate alla realizzazione dello strato di collegamento e di base sono di natura calcarea, derivanti dalla frantumazione di rocce sedimentarie di composizione chimico-mineralogica carbonatica (rocce calcaree). La Tabella 2 riporta la percentuale di passanti della miscela di progetto, uguale per strato di base e di binder.

Setacci [mm]	Passante Calcare 0/4 [%]	Passante Calcare 8/20 [%]	Passante Calcare 14/32 [%]	Passante Filler calcareo [%]
31,5	100	100	100	100
20	100	100	48,5	100
14	100	84,5	2,9	100
10	100	32,4	0,9	100
6,3	100	0,9	0,9	100
2	65,1	0,9	0,9	100
0,5	22,2	0,9	0,9	100
0,25	8,7	0,9	0,9	100
0,063	0,7	0,9	0,9	81,1

Tabella 2 - Percentuale passante aggregati vergini miscela base - binder

Aggregato riciclato

Agli aggregati vergini è stato aggiunto del fresato indistinto senza preventiva vagliatura, pezzatura 0/14, derivato dalla rimozione di strati ammalorati di vecchie pavimentazioni (nel caso specifico autostradali). Da estrazioni del legante tramite solvente si è ottenuto che la percentuale di bitume presente è pari a 4.91% rispetto al peso degli aggregati.

La percentuale di aggregato riciclato (RAP-Reclaimed Asphalt Pavement) è del 25% negli strati di collegamento e del 30 % negli strati di base.

In Figura 10 e Figura 11 si mostrano le curve granulometriche di progetto (aggregati vergini e riciclati) nei fusi da Capitolato rispettivamente per lo strato di binder e di base.

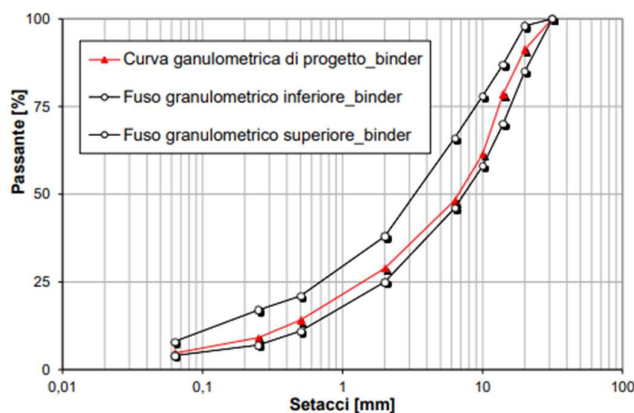


Figura 10 - Curva granulometrica di progetto binder

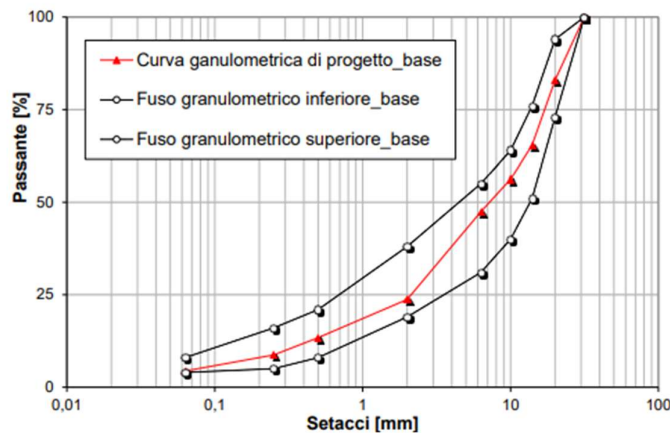


Figura 11 - Curva granulometrica di progetto base

Bitume

Le miscele di conglomerato bituminoso studiate sono state tutte confezionate impiegando lo stesso bitume vergine d'aggiunta di tipo "hard", modificato con polimeri SBS in percentuale pari al 3.8% in peso rispetto al bitume, le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 3.

Caratteristica	Norma di riferimento	Unità di misura	Valori di riferimento	Valori rilevati
Percentuale di polimero	-	[%]	3.8	-
Penetrazione @ 25°C	EN 1426 [N5]	[dmm]	50 - 70	54
Punto di Rammollimento (P.A.)	EN 1427 [N6]	[°C]	≥ 65	71
Ritorno elastico @ 25°C; 25cm/min	EN 13398 [N7]	[%]	≥ 50	89
Viscosità dinamica @ 135°C	ASTM D4402 [N8]	[Pa·s]	-	1.24
Caratteristica dopo RTFOT	Norma di riferimento	Unità di misura	Valori di riferimento	Valori rilevati
Variazione di massa massima ±	EN 12607-1 [N9]	[%]	≤ 0.5	0.05
Penetrazione @ 25°C	EN 1426 [N5]	%	≥ 50	27
Punto di Rammollimento (P.A.)	EN 1427 [N6]	[°C]	≥ 65	77

Tabella 3- Contenuto bitume della miscela

Anche la percentuale di bitume è la stessa per entrambe le miscele, e varia da base e binder: da progetto, si ha nello strato di base una percentuale pari al 4.5 % rispetto al peso degli aggregati, mentre per lo strato di collegamento si ha il 4.8 % rispetto al peso degli aggregati.

Grazie a precedenti studi su conglomerati modificati *Pavimental*, si è ipotizzato una Performance Grade (PG) del bitume pari a 76-16, necessario per la determinazione dei parametri di prova a modulo complesso e a fatica.

Additivo WMA

La miscela tiepida è stata realizzata con tecnologia WMA con l'aggiunta di un additivo chimico, il dosaggio di quest'ultimo è differente per i vari strati della pavimentazione: 0.42% in peso rispetto al bitume vergine per il tappeto drenante, 0.5% in peso rispetto al

bitume vergine di aggiunta per lo strato di collegamento ed il 0.55% in peso rispetto al bitume vergine per lo strato di base.

Tale additivo è composto da derivati di sostanze amminiche ed è stato appositamente realizzato per la produzione di conglomerato bituminoso tiepido (WMA), e viene immesso in impianto in linea col bitume. Secondo le indicazioni fornite dalla scheda tecnica, se aggiunto al bitume caldo, tale additivo consente di abbassare notevolmente la temperatura di produzione e di compattazione del conglomerato bituminoso, potendo fornire al contempo un consistente contributo anche in qualità di attivante di adesione.

In particolare, secondo le indicazioni fornite dal produttore, il confezionamento del conglomerato bituminoso contenente tale additivo può avvenire mediante riscaldamento degli aggregati lapidei a soli 125°C - 130°C, consentendo la successiva stesa a temperature comprese tra i 90°C e i 120°C. A temperature prossime a 25°C si presenta sotto forma di liquido viscoso con una densità circa pari a 1 g/cm³. È inoltre caratterizzato da una temperatura operativa minima di -8°C, una temperatura di flash point superiore a 140°C e una viscosità a 15°C di 450 cP. Risulta un prodotto stabile alle normali temperature di stoccaggio se mantenuto al coperto in contenitori chiusi.

3.1.1 Carotaggio dei provini per le prove di modulo e fatica

Dopo aver verificato che il diametro massimo della miscela fosse non superiore di 19 mm (condizione richiesta dalle Norme di riferimento [3,4]), si è proceduto con l'adozione di "provini piccoli", di diametro pari a 38 mm, per l'esecuzione delle prove. Tale geometria, sviluppata recentemente dal gruppo di ricerca del North Carolina State University guidata dal Prof. Richard Kim, è stata particolarmente vantaggiosa dal punto di vista operativo poiché ha consentito un numero maggiore di provini disponibile, sopperendo al numero molto limitato di carote da sito. Inoltre, ha consentito un minor consumo di materiale per l'esecuzione delle prove e una maggiore velocità grazie ai ridotti tempi di condizionamento rispetto alle tradizionali geometrie con provini di diametro di 100 mm.

Le carote da sito di diametro pari a 150 mm sono state prima rifilate, riducendo il raggio di 20 mm per lato con due tagli verticali paralleli, distanziati di 110 mm, in modo tale da poter ricavare attraverso carotaggio orizzontale provini di altezza utile pari a 110 mm e diametro pari a 38 mm [Figura 12]. Tali provini sono stati successivamente contraddistinti attraverso una sigla numerica, la prima cifra stava ad indicare la carota di provenienza, mentre la seconda il numero di provino.

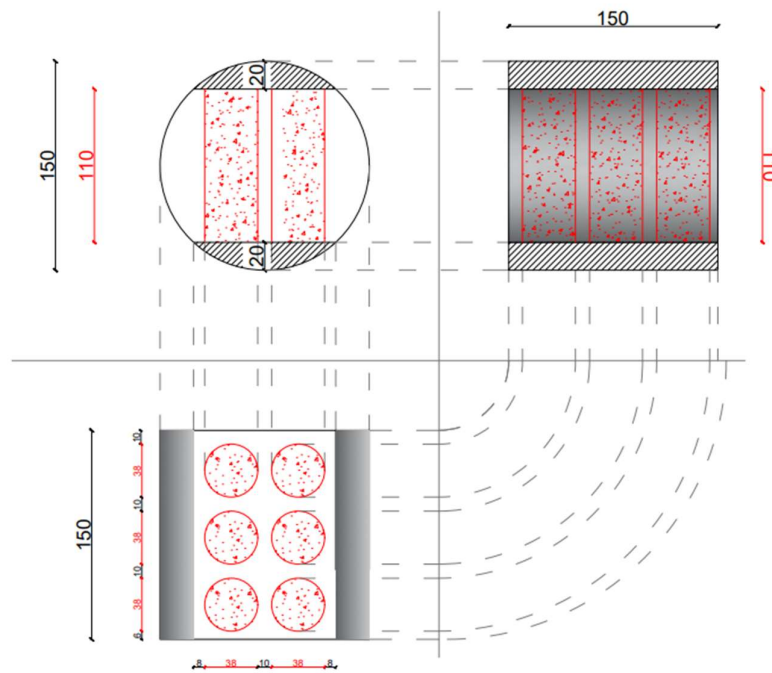


Figura 12 - Schema di taglio per provini da 38 mm per lo strato di base di altezza pari a 150 mm

In base all'effettivo spessore dello strato, è stato possibile ricavare da 3 a 6 provini per strato per ciascuna carota [Figura 13].



a



b

Figura 13- Provini ottenuti da carote prelevate in sito: (a) strato di binder e (b) strato di base.

3.2 Metodi di prova

Sono state effettuate diverse caratterizzazioni dei materiali e varie prove. Nei seguenti paragrafi verranno spiegate le singole prove.

3.2.1 Estrazione del bitume

L'estrattore [Figura 14] separa il bitume dagli aggregati. Questo è possibile grazie a cicli di lavaggio del conglomerato bituminoso con solvente (percloro etilene) che “lava” l'aggregato dal bitume. Il solvente, sporco di bitume, viene ripulito in vasca di decantazione e poi rimandato in circolo; esso inoltre viene mandato nel sistema di raffreddamento (di sinistra). A fine estrazione, si ha l'aggregato pulito; il bitume presente nella miscela si ricava per differenza dalle pesate. La norma a cui si è fatto riferimento è la UNI EN 12697-1 [5].

Procedura di prova:

1. Prestando attenzioni alle indicazioni e alle procedure di avviamento viene acceso il macchinario;

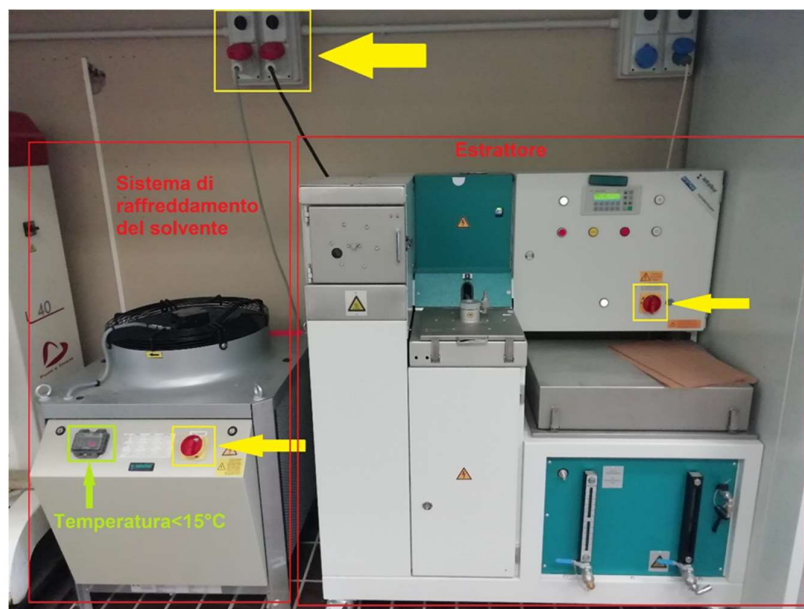


Figura 14 - Estrattore a destra e sistema di raffreddamento del solvente a sinistra

2. Si attende che il sistema sia pronto, attendendo la scritta *Concentrating ready* -> *ESC* sul display [Figura 15].

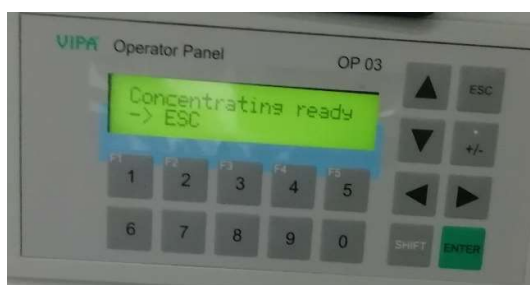


Figura 15 - Display Estrattore

3. A questo punto è possibile impostare i cicli di lavaggio e asciugatura, 6+6 nel caso in esame.
4. Successivamente viene inserito all'interno del cestello [Figura 16] il materiale, per poi inserirlo nell'estrattore. La norma consiglia di utilizzare per la prova almeno 1 kg di conglomerato bituminoso.
5. È necessario inserire poi la carta all'interno della capsula dove successivamente verrà raccolto il filler.



Figura 16 – A sinistra cestello – A destra tappo di chiusura

L'estrazione può partire effettuando 6 cicli di lavaggio più 6 cicli di asciugatura; a fine estrazione con molta cautela (per via delle temperature elevate) è possibile estrarre il cestello e pesarlo.

Per il calcolo della quantità di bitume si procede con la determinazione di queste quantità:

1. Quantità conglomerato bituminoso = [PESO LORDO CESTELLO] – [TARA CESTELLO];
2. Aggregati cestello = [TARA CESTELLO + AGGREGATO PULITO] – [TARA CESTELLO];
3. Filler capsula = [TARA CAPSULA + FILLER] – [TARA CAPSULA];
4. Totale aggregato = Aggregati cestello + Filler capsula
5. Bitume = Quantità conglomerato - Totale aggregato

Successivamente viene determinata la percentuale di bitume rispetto alla miscela e rispetto agli aggregati attraverso le seguenti formule:

$$\%Bitume_{miscela} = \frac{Bitume_{tot} [g]}{Materiale\ di\ prova [g]} * 100$$

$$\%Bitume_{aggregato} = \frac{Bitume_{tot} [g]}{Totale\ Aggregato [g]} * 100$$

Le percentuali di bitume ottenute dalle estrazioni sono consultabili nel capitolo §4.1;

In seguito, si è effettuata una setacciatura del materiale “pulito”, che è stata effettuata del solo materiale del cestello. Il filler risultante verrà sommato successivamente a quello ottenuto dalla capsula dell'estrattore.

3.2.2 Setacciatura

Dopo un processo di estrazione del conglomerato bituminoso, si è deciso di procedere con una setacciatura degli aggregati per andare a ricostruire la curva granulometrica dello strato di base e dello strato di collegamento (binder).

La setacciatura è un processo di separazione meccanica del materiale, attraverso l'utilizzo di setacci (maglia quadrata) [Figura 17]. La norma di riferimento seguita è la UNI EN 933-1 [6]. Nel caso in esame sono stati utilizzati setacci di apertura (a maglie quadrate) pari a 31.5, 20, 16, 10, 6.3, 2, 0.5, 0.25 ed 0.063 mm.

Procedura di prova:

1. Si impilano i setacci dalla maglia più grande a quella più piccola.
2. Il materiale di prova secco viene lasciato nel setaccio superiore da 31.5 mm e viene posato il coperchio della fila dei setacci.
3. Il tutto viene poi inserito in un vibrovaglio che separa il materiale nelle diverse granulometrie [Figura 17]. L'operazione di setacciatura ha durata di 15 minuti.
4. Successivamente si pesa il trattenuto ad ogni singolo setaccio.
5. Con semplici operazioni di calcolo è possibile determinare il "passante percentuale" necessario per andare a ricostruire la curva granulometrica del materiale.



Figura 17- Setaccio (sinistra), vibrovaglio (destra)

3.2.3 Picnometri

Per la determinazione dei vuoti dei diversi strati si ha la necessità di conoscere la massa volumica teorica massima della miscela, dipendente principalmente dalla massa volumica degli aggregati. Quest'ultima può essere ricavata tramite l'utilizzo del picnometro [Figura 18]. Si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 1097-6 [7]. La prova va svolta su materiale cosiddetto "grosso" o su materiale cosiddetto "fine": il passante al 31.5 e trattenuto al 4 mm, e il passante al 4 mm e trattenuto al 0.063 mm rispettivamente.

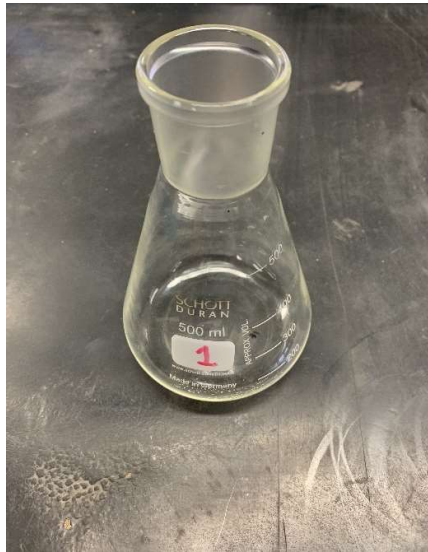


Figura 18- Picnometro

Procedura di prova:

1. Si setaccia l'aggregato con fila di setacci: 31.5, 4 mm, 0.063.
2. Si inserisce all'interno del picnometro circa 600 g di materiale grosso o alternativamente circa 300 g di materiale fine. Si registra la quantità di materiale secco inserito con una pesata "M4" [Figura 19];

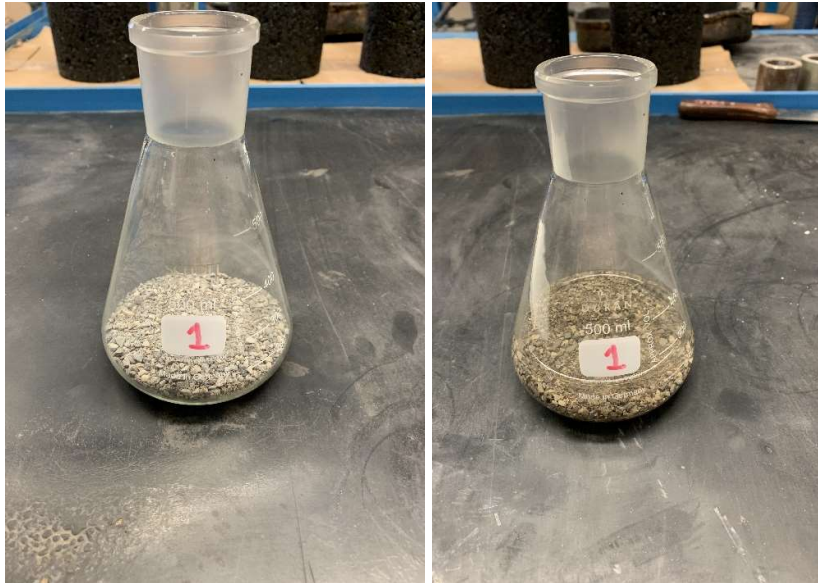


Figura 19- A Sinistra, Picnometro con materiale di prova secco (M4) – A destra, Picnometro con materiale immerso

3. Si riempie il picnometro con all'interno il materiale con l'acqua, la quantità necessaria affinché tutti gli aggregati siano ricoperti [Figura 19];
4. Il picnometro viene lasciato in camera climatica a 20 °C per 12 ore per permettere all'aggregato di assorbire l'acqua;
5. Completato il condizionamento si aggiunge dell'acqua, anch'essa condizionata a 20 °C per poi estrarre attraverso una pompa per il sottovuoto l'aria all'interno [Figura 20]. Minore è la dimensione dell'aggregato e maggiore sarà la durata del sottovuoto, al fine di eliminare tutta l'aria intrappolata tra i granuli.

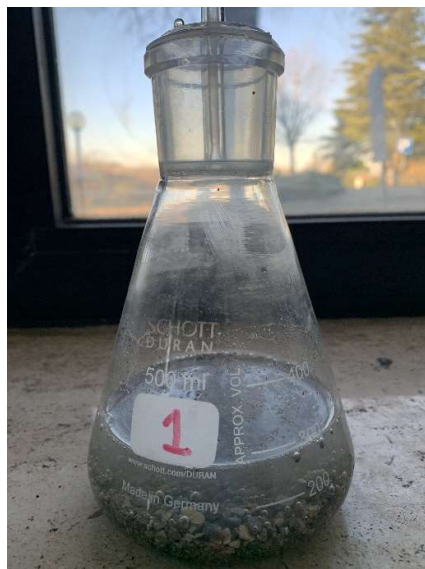


Figura 20- Picnometro sottovuoto

6. Successivamente viene riempito il picnometro completamente di acqua e pesato “M2” [Figura 21]. Viene inoltre misurata la temperatura dell’acqua t_w ;
7. Si pulisce accuratamente il picnometro per poi riempirlo solamente di acqua, alla temperatura di $t_w \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, e ricavarne il peso “M3” [Figura 22].

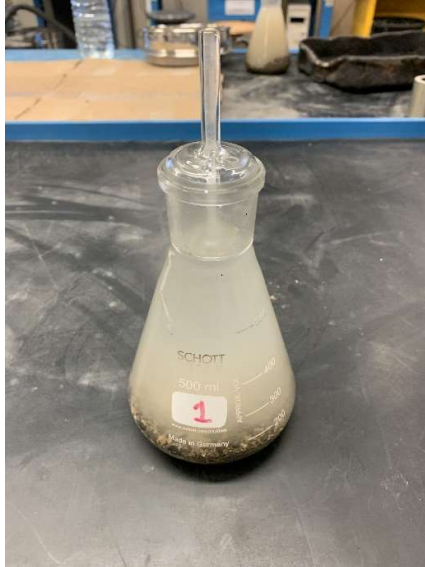


Figura 21- Picnometro M2

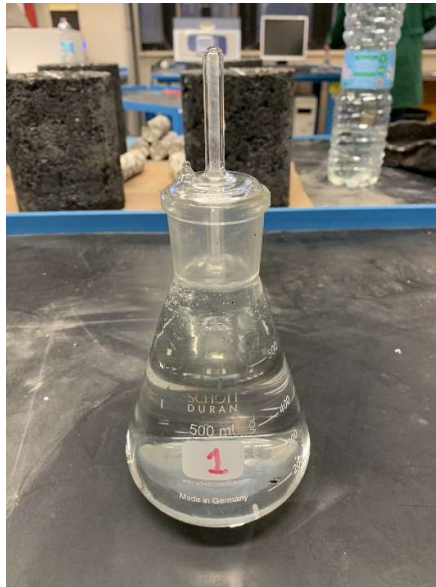


Figura 22- Picnometro M3

8. Si ricava la massima volumica dell’aggregato come:

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

in cui

$$\rho_w = 1.00025205 + (7.59 \cdot t_w - 5.32 \cdot t_w^2)/10^6 \quad [\text{Mg/m}^3]$$

M2 è la massa del picnometro contenente il campione di aggregato saturo e l'acqua [g]

M3 è la massa del picnometro riempito con sola acqua [g]

M4 è la massa in aria della porzione di prova essiccata [g]

Per la determinazione della massa volumica massima della miscela si utilizza la seguente formula:

$$\rho_{miscela} = \frac{100}{\frac{100 - \%bit}{\rho_{aggr}} + \frac{\%bit}{\rho_{bit}}}$$

Dove:

ρ_{aggr} = massa volumica degli aggregati [g/cm³]

ρ_{bit} = massa volumica del bitume, assunta pari a 1.02 [g/cm³]

$\rho_{miscela}$ = massa volumica della miscela [g/cm³]

%bit = percentuale bitume rispetto alla miscela [%]

Nel capitolo §4 sarà possibile osservare i risultati.

3.2.4 Contenuto di vuoti

Le caratteristiche meccaniche delle miscele in sito sono strettamente influenzate dal contenuto dei vuoti. Per la sperimentazione tramite metodo S-VECD è necessario conoscere la percentuale di vuoti dei provini tramite metodo della superficie satura asciutta (SSA). Si è potuto facilmente determinare il valore dei vuoti seguendo la normativa di riferimento UNI EN 12697-6 [8].

Procedura di prova:

1. Viene effettuata una pesata asciutta del provino di conglomerato bituminoso (dry), denominata M1;
2. Si effettua una pesata idrostatica del provino ottenendo così M2;
3. Il provino viene lasciato condizionare immerso in acqua per 20 minuti;
4. Si asciuga superficialmente il provino eliminando solamente lo strato libero di acqua (condizione di superficie satura asciutta) e viene effettuata nuovamente una pesata ottenendo così M3.

Si monitora costantemente la temperatura dell'acqua per la determinazione della massa volumica ρ_w :

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7.59 \times t - 5.32 \times t^2}{10^6} \right)$$

Dove:

t = Temperatura dell'acqua [C°]

ρ_w = Massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [Mg/m³]

Per la determinazione della percentuale di vuoti è necessario calcolare prima la massa volumica SSA del provino (ρ_{bssd})

$$\rho_{bssd} = \frac{m1}{m3 - m2} \times \rho_w$$

Dove:

$m1$ = massa del provino secco [g]

$m2$ = la massa del provino in acqua [g]

$m3$ = la massa del provino a superficie satura asciutta [g]

ρ_w = Massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [Mg/m³]

ρ_{bssd} = massa volumica SSA [g/cm³]

Infine, per determinare la percentuale di vuoti viene utilizzata la seguente formulazione:

$$\%Vuoti\ SSA = \frac{\rho_{max,miscela} - \rho_{bssd}}{\rho_{max,miscela}} \times 100$$

Dove:

%Vuoti SSA = Percentuale vuoti del provino con metodo della superficie satura asciutta

$\rho_{max,miscela}$ = massa volumica massima della miscela [g/cm³]

ρ_{bssd} = massa volumica in mucchio [g/cm³]

I risultati ottenuti possono essere osservati nel capitolo §4.

3.3 Metodo S-VECD

Nel presente progetto di tesi è stato applicato il metodo S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage), che è considerato uno dei modelli più affidabili ed innovativi per studiare il comportamento a fatica delle miscele bituminose. Il modello è stato sviluppato dal gruppo di ricerca della North Carolina State University (NCSU).

Le prove di laboratorio previste per l'applicazione del metodo sono:

- Prove di modulo complesso, in accordo con l'AASHTO TP 132 [3], che permettono di valutare il comportamento meccanico delle miscele nel dominio viscoelastico lineare;
- Prove di fatica a trazione diretta, in accordo con l'AASHTO TP 133 [4], che permettono di osservare il comportamento durante la fessurazione del materiale;
- Prove di accumulo delle deformazioni permanenti, che però nel presente studio non sono state effettuate a causa del numero limitato di carote da sito.

I risultati delle prove di modulo e fatica sono poi elaborati grazie a un foglio di calcolo Excel appositamente implementato dal gruppo di ricerca del North Carolina State University.

Nei paragrafi a seguire si descrivono nel dettaglio le condizioni di input e le procedure di prova applicate, e i metodi di elaborazione eseguiti.

3.3.1 Prova di modulo complesso

La prova per la determinazione del modulo complesso è stata eseguita in accordo con la normativa AASHTO TP 132 [3]. La determinazione di tale parametro è stata effettuata mediante l'utilizzo del macchinario AMPT (Asphalt Mixture Performance Tester) [Figura 23] presente nel laboratorio di Strade Ferrovie ed Aeroporti dell'Università Politecnica delle Marche.



Figura 23 - AMPT

Il modulo complesso o dinamico è un parametro fondamentale per la caratterizzazione dei conglomerati bituminosi. Per ottenere la “curva maestra” è necessario testare il provino a varie temperature ed a varie frequenze [Tabella 4], determinate grazie al Performance Grade pari a 76-16 secondo la normativa $\Phi 38$ AASHTO TP 132 [3].

Table 1—Recommended Testing Temperatures and Loading Frequencies

PG 58-XX and Softer			PG 64-XX and Stiffer		
Temperature, °C	Temperature, °F	Loading Frequencies, Hz	Temperature, °C	Temperature, °F	Loading Frequencies, Hz
4	39	10, 1, 0.1	4	39	10, 1, 0.1
20	68	10, 1, 0.1	20	68	10, 1, 0.1
35	95	10, 1, 0.1	40	104	10, 1, 0.1

Tabella 4- Condizioni e temperatura di prova secondo il PG

Il provino è sollecitato da una compressione sinusoidale (Haversine) a varie frequenze, tale prova come detto in precedenza permette la determinazione del modulo complesso e quella dell'angolo di fase, parametri necessari per la caratterizzazione visco-elastica lineare del materiale.

Procedura di prova

Gli accessori necessari per la realizzazione della prova e la preparazione del provino sono [Figura 24, Figura 25]:

1. Riscontri
2. Macchina ad aria compressa per attaccare i riscontri
3. Colla bi- componente
4. X-men (morsetti)
5. 3 trasduttori
6. Basi per provini da 38 mm



Figura 24- a: Riscontri, b: X-men, c: Trasduttori



Figura 25 – a: Macchina per il montaggio riscontri con base da 38mm, b: setup di prova

Per poter svolgere la prova bisogna attaccare 6 riscontri al provino, attraverso un macchinario ad aria compressa [Figura 25] che ne permette l'incollaggio nella giusta posizione determinando le tre verticali di misura. I riscontri vanno inseriti all'interno dei bracci dello strumento, ricoprendo la faccia esposta di colla bi-componente, successivamente si inserisce il provino e lo si ruota in modo tale che nelle verticali dei riscontri non ci siano vuoti o aggregati grossi. Infine, si aziona la macchina che chiudendosi fa aderire perfettamente i riscontri alla superficie del provino.

Avvenuto l'indurimento della colla è possibile spegnere la macchina che farà aprire i bracci per poi ottenere il provino con i riscontri montati correttamente. Una volta eseguite le operazioni preliminari è necessario condizionare i provini in camera climatica per 1 ora.

Trascorsa l'ora di condizionamento è possibile accendere il macchinario AMPT ed eseguire le prove secondo le seguenti fasi:

Viene acceso l'AMPT e si imposta la temperatura di prova [Figura 26] utilizzando gli appositi pulsanti.



Figura 26- Comandi AMPT esterni

A questo punto è possibile avviare il computer e collegare all'AMPT tramite apposito cavo. Acceso il computer viene avviato il programma UTS006 [Figura 27].

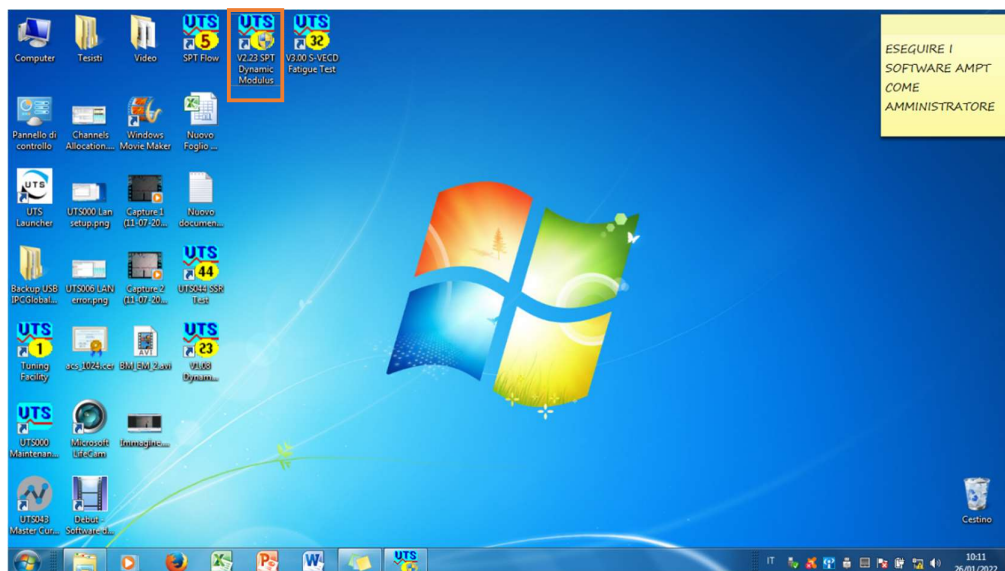


Figura 27- Software UTS006

Esistono diversi tipi di *template*, attraverso i quali è possibile inserire automaticamente all'interno del software alcuni dati preimpostati utili alla corretta applicazione del carico in base alla rigidità del provino.

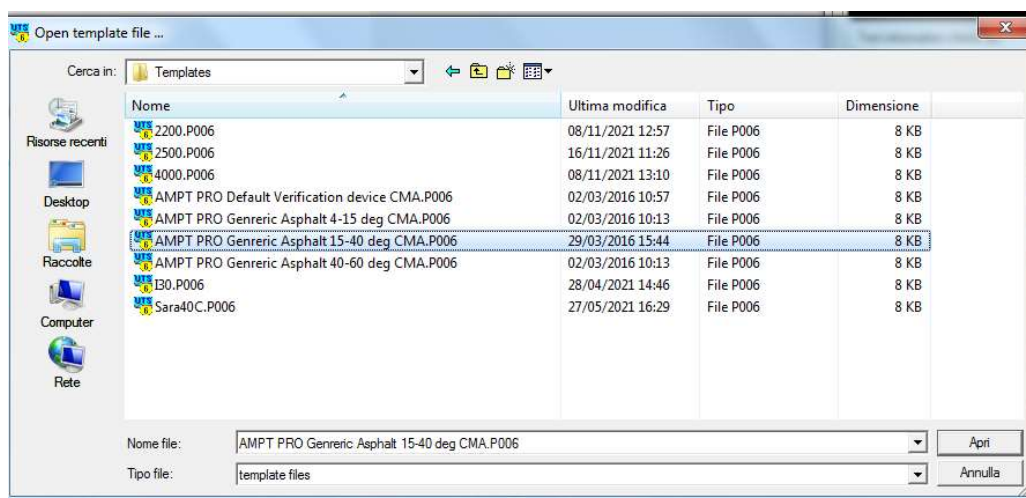


Figura 28- Schermata scelta template

Vengono inseriti gli x-men al provino, successivamente si inserisce all'interno della campana il provino con l'apposito set up di prova da 38 mm.

A questo punto sarà necessario inserire dei trasduttori [Figura 24], che misureranno le deformazioni. Tramite un'apposita finestra del programma [Figura 29], è possibile azzerare la corsa dei trasduttori.

Una volta sistemata la corsa dei trasduttori è possibile abbassare la campana ed iniziare la procedura di *tuning*.

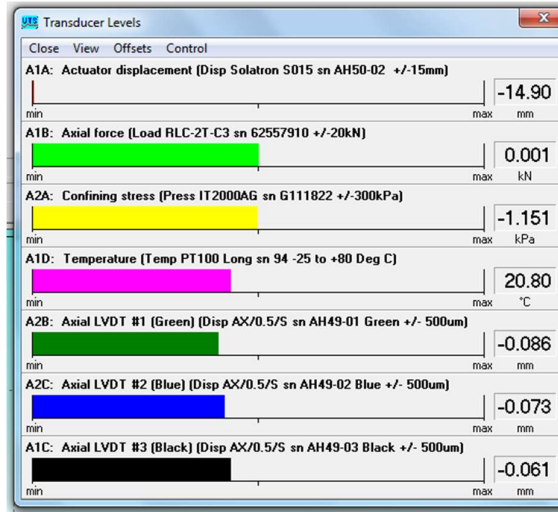


Figura 29- Schermata levels

Per evitare di avere valori fuori dal range alla fine della prova, causata solitamente da una differente distribuzione di carico sulla faccia del provino si procede con il *tuning* [Figura 30] per il centraggio del provino.

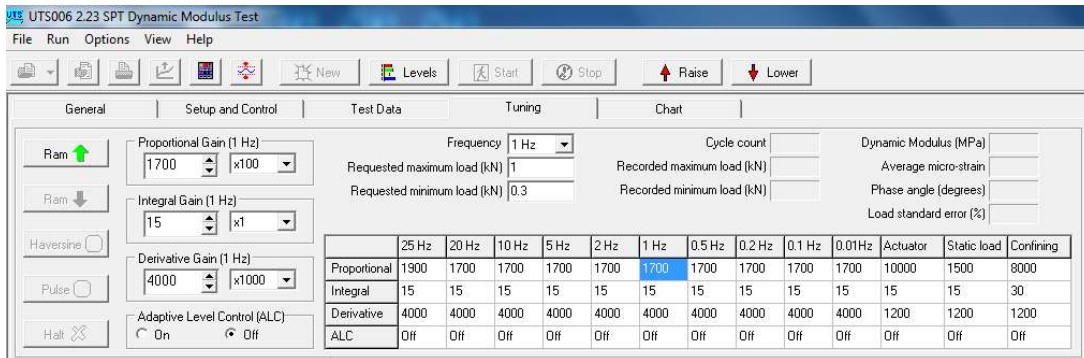


Figura 30- Tuning

Successivamente è necessario accendere i motori del macchinario [Figura 31]. Le prime 2 righe riguardano le parti idrauliche, quindi vengono accesi i motori premendo in successione i tasti *LOW* e *HIGH* della prima riga, poi solo *LOW* della seconda, questo perché si stanno utilizzando provini da 38 mm e pertanto non è necessaria tutta la potenza del materiale

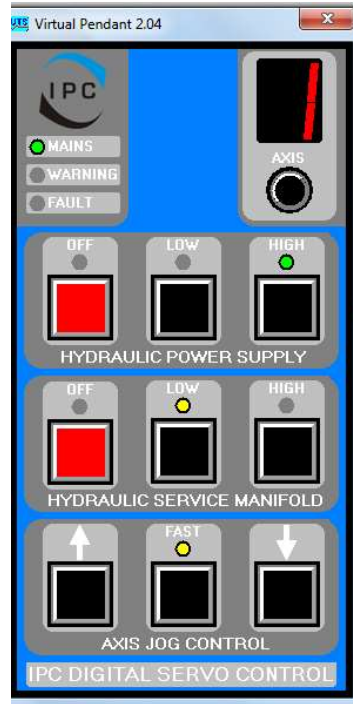


Figura 31- Schermata accensione motori

Premendo poi sulla destra il tasto *Ram* con Freccia su sulla sinistra [Figura 32]: avviene il contatto con la testa di carico. È già possibile vedere se la pallina di carico deve spostarsi per equilibrare il provino, quindi eventualmente dove spostare il provino rispetto alla base.

Quindi impostare il *Max load* e il *Min Load* a seconda della temperatura del provino più alta è la temperatura più basso devo inserire il max load, per evitare che il provino si danneggi [Figura 32].

Premendo il tasto *Haversine* è possibile far avviare la prova [Figura 32].

L'obiettivo è che le ampiezze delle deformazioni misurate dai tre trasduttori siano simili, nel caso in cui un trasduttore o più non siano simili è necessario alzare la campana per centrare meglio il provino.

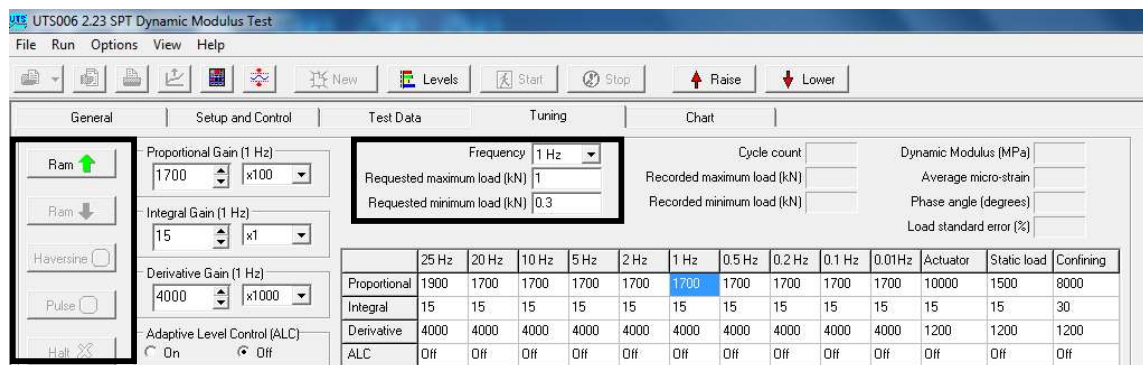


Figura 32 - pulsanti e parametri di prova

Eseguite le operazioni di *tuning* è possibile eseguire la prova a 1Hz.

Alla conclusione della prova a 1 Hz è previsto il condizionamento del provino all'interno del macchinario per 30 minuti

Successivamente ai 30 minuti di condizionamento è possibile eseguire la prova di modulo andando ad inserire tutti i parametri e andando a spuntare le frequenze di prova, nel caso in esame sono state inserite le seguenti frequenze: 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0.5 Hz, 0.1 Hz [Figura 33].

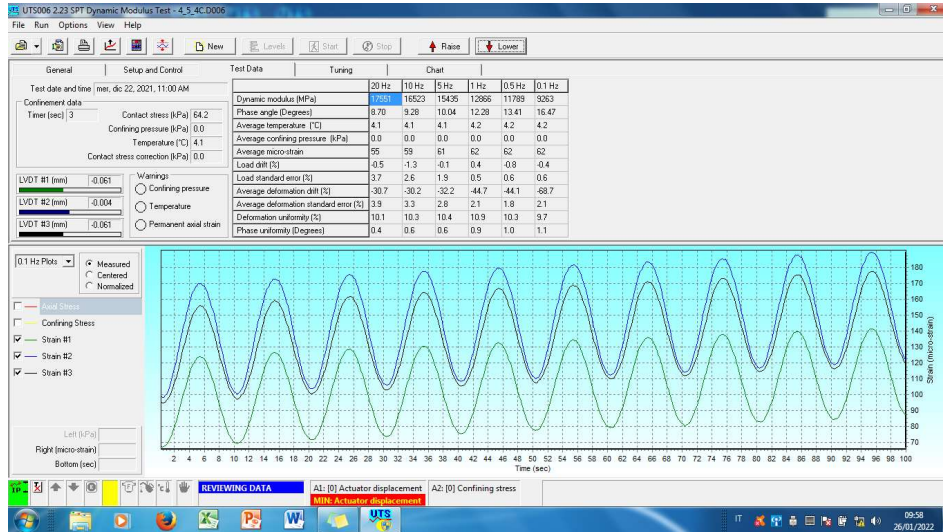


Figura 33- Prova di modulo complesso alle varie frequenze

Una volta terminata la prova si provvede ad esportare i file. Ora è possibile togliere gli x-men dal provino e ripetere l'operazione per tutti i provini a tutte le varie temperature che nel caso in esame sono 4 – 20 – 40 C°.

Elaborazione

Per studiare le curve maestre è necessario l'utilizzo di un modello di riferimento per fittare i dati sperimentali. Nel caso in questione, il metodo S-VECD prevede l'applicazione del modello 2S2P1D del solo modulo di immagazzinamento E1 [Figura 34]: 2 spring, 2 Parabolic Element, 1 Dashpot.

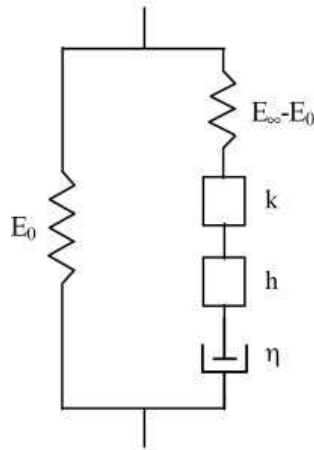


Figura 34- Schematizzazione del modello 2S2PID

La formulazione originaria del modello, previsto per il modulo complesso “totale” E^* è la generalizzazione di Huet-Sayegh, ed è adatto sia per bitumi che per conglomerati bituminosi. La generalizzazione consiste nell’aggiunta di uno smorzatore per simulare l’andamento della rigidezza di un bitume a basse frequenze.

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

Dove:

$E^*(i\omega\tau)$ = Modulo Complesso

E_0 = Asintoto gommoso alle basse frequenze

E_∞ = Asintoto vetroso alle alte frequenze

δ = parametro di forma, proporzionalità tra i due elementi parabolici

$(i\omega\tau)^{-k}$ = primo elemento parabolico

$(i\omega\tau)^{-h}$ = secondo elemento parabolico

$(i\omega\beta\tau)^{-1}$ = smorzatore (dashpot)

Per studiare al meglio il comportamento termo-reologico di un materiale si introducono 2 grafici, il grafico di Black e di Cole-Cole:

Il diagramma di Black si ottiene riportando i valori di angolo di fase nell’asse delle ascisse e il modulo nell’asse delle ordinate (in scala logaritmica). Il diagramma di Cole-Cole si ottiene inserendo i valori di $E1$ (modulo di immagazzinamento) nell’asse delle ascisse e di $E2$ (modulo di dissipazione) nell’asse delle ordinate. Questi due valori si calcolano attraverso le seguenti formule:

$$E1 = E \times \cos \delta$$

$$E2 = E \times \sin \delta$$

Dove:

$E = \text{modulo complesso}$

$\delta = \text{angolo di fase}$

In particolare, nel diagramma di Cole-Cole è possibile determinare il significato fisico di ogni elemento del modello [Figura 35]

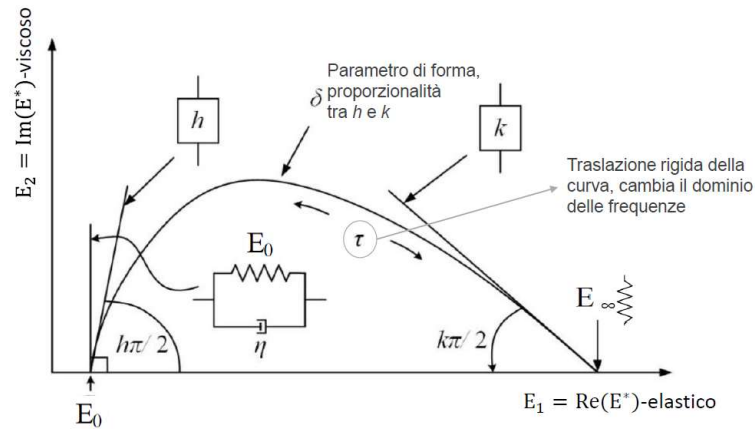


Figura 35 - Diagramma di Cole-Cole applicato a 2S2P1D

Le formulazioni approfondite non verranno trattate in questo elaborato, si introduce solamente il concetto di modello per comprendere i risultati del capitolo successivo. Per approfondimenti riguardanti la modellazione teorica si rimanda all'articolo di Olard e Di Benedetto [9]. I risultati delle prove di modulo saranno illustrati nel capitolo §4.2.

3.3.2 Prove di Fatica

Oltre alle prove di modulo complesso, si sono effettuate delle prove di rottura a fatica. Il macchinario utilizzato per le prove a fatica è il medesimo delle prove di modulo l'AMPT [Figura 36]. La normativa a cui si fa riferimento è la AASHTO TP 133 [4].

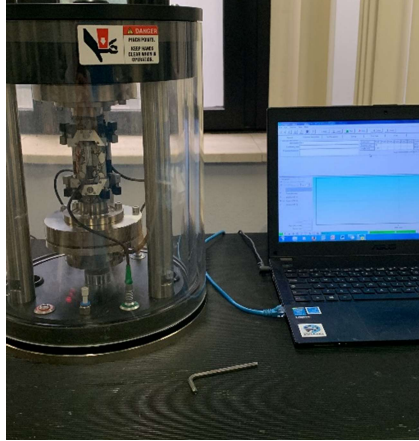


Figura 36 - AMPT Prova a Fatica

Per effettuare la prova con provini da 38 mm un accorgimento da avere è quello del massimo diametro degli aggregati nella miscela che sia di 19 mm, questo limite se non rispettato potrebbe portare a dei risultati poco rappresentativi.

Un attuatore a controllo di spostamento applica al provino un carico assiale ciclico di pura trazione alla frequenza di 10 Hz fino a rottura. L'output della prova sono i dati di modulo complesso, angolo di fase e deformazione all'aumentare dei cicli di carico.

La prova di fatica è preceduta da un *fingerprint test* con il quale si misura la rigidità del provino in trazione-compressione per cogliere la variabilità del provino; questo test ha lo scopo di caratterizzare le proprietà viscoelastiche del provino, attraverso la misura del modulo complesso e fornisce un'idea sul livello deformativo orientativo. La prova è basata sulla teoria del VECD (ViscoElastic Continuum Damage) [10].

La temperatura di prova viene stabilita dal PG (Performance Grade) del bitume:

$$\frac{(T_{max} - T_{min})}{2} - 3C^{\circ} \leq 21C^{\circ}$$

Quindi la temperatura di prova è 21°C.

Per realizzare una buona retta di rottura si ha la necessità ottenere almeno 3 prove valide, ognuna ad un diverso livello deformativo al fine di ottenere durate differenti.

Gli accessori necessari per la realizzazione della prova e la preparazione del provino sono:

1. Il provino con i riscontri attaccati deve essere incollato alle teste di carico, la geometria di prova è 38 mm di diametro e 110 mm di altezza.
2. Le 3+3 viti per avvitare i piatti di carico;

3. 6 X-men [Figura 24]
4. 3 trasduttori: verde, blu e nero [Figura 24]

Il provino già provvisto di riscontri deve essere incollato alle teste di carico, questa operazione può essere effettuata tramite l'utilizzo di un'apposita attrezzatura e la colla bi-componente. Le teste di carico vanno ricoperte superficialmente di colla, insieme alle due facce del provino, successivamente il provino viene inserito all'interno dell'attrezzatura che ne permetterà un corretto posizionamento verticale ed orizzontale [Figura 37].



Figura 37 - Attrezzatura per incollaggio delle teste di carico

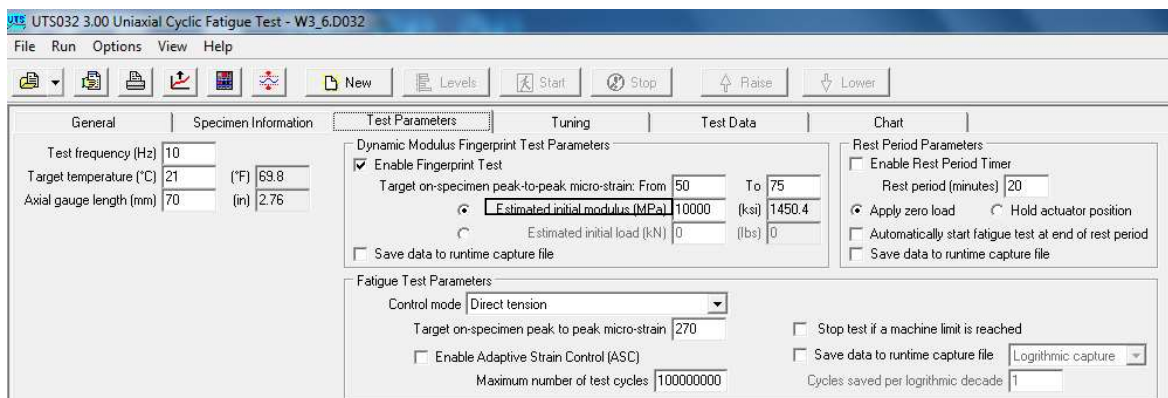


Figura 40- Estimated Initial modulus e schermata Test parameters

Il provino viene inserito all'interno del macchinario avvitando le teste di carico.

Per le operazioni successive è necessario accendere i motori del macchinario [Figura 31]. Le prime 2 righe riguardano le parti idrauliche, e si devono premere in successione i tasti *LOW* e *HIGH* della prima riga, poi della seconda.

Ora il provino è sottoposto ad una leggera trazione dovuta al serraggio delle viti, quindi, è necessario scaricare la tensione tramite il comando *Apply Zero*;

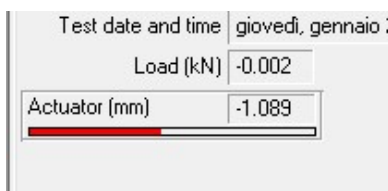


Figura 41 - Load provino post Apply Zero Load

A questo punto è possibile attaccare i trasduttori verde, blu e nero, allineando il punto rosso del trasduttore col punto rosso del jack. Si inseriscono i trasduttori verticalmente tra gli x-men.

Ora come precedentemente descritto per le prove di modulo anche qui è necessario l'azzeramento della corsa dei trasduttori.

Successivamente viene impostata la temperatura di condizionamento utilizzando gli appositi pulsanti [Figura 42] e si chiude la campana.



Figura 42- Pulsanti per abbassare la campana in giallo e temperature control blu

Per i provini da 38 mm il condizionamento all'interno dell'AMPT è di 30 minuti.

Si inseriscono quindi i parametri di prova, nella schermata di *General* [Figura 43]:

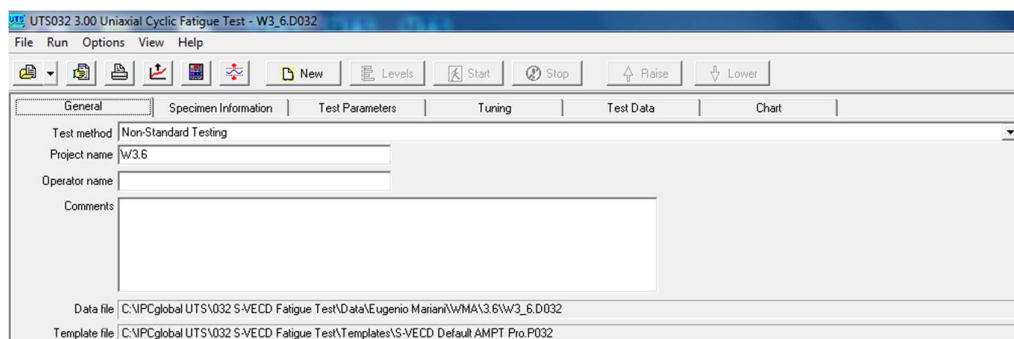


Figura 43- General

Prima che venga effettuata la prova a fatica si effettua la prova di modulo. Si impostano quindi la temperatura di prova (i.e. 21 °C), il *peak to peak microstrain* tra 50 e 75 ed una stima del modulo iniziale alla frequenza di prova pari a 10 Hz [Figura 40]. Dal Fingerprint si verificano le ampiezze delle sinusoidi delle deformazioni e si verifica se siano simili, se questo non fosse così, vorrebbe dire che una verticale è meno caricata di un'altra. Dai moduli ricavati e dal *fingerprint test*, è possibile determinare il DMR (dynamic modulus ratio), altro non è che il rapporto tra il modulo complesso del *fingerprint* e il modulo ottenuto dalla curva maestra, entrambi alla stessa temperatura e frequenza. Il DMR caratterizza l'omogeneità tra provini della stessa famiglia; affinché le prove siano valide, il suo valore deve essere compreso tra 0.85 e 1.15.

In seguito, si procede con la prova a fatica dopo aver aspettato cinque minuti affinché il provino non risenta della sollecitazione derivata dalla prova di modulo. Quindi viene inserito il livello di deformazione *peak to peak micro-strain*, unico parametro

fondamentale da inserire per la prova di fatica. Il parametro è determinante per la durata della prova. La scelta è basata sulla rigidezza del provino e sulla durata della prova. In generale, più è alto il livello deformativo, più breve sarà la prova. Inoltre, a parità di deformazione, un materiale rigido arriverà a rottura prima di un materiale meno rigido.

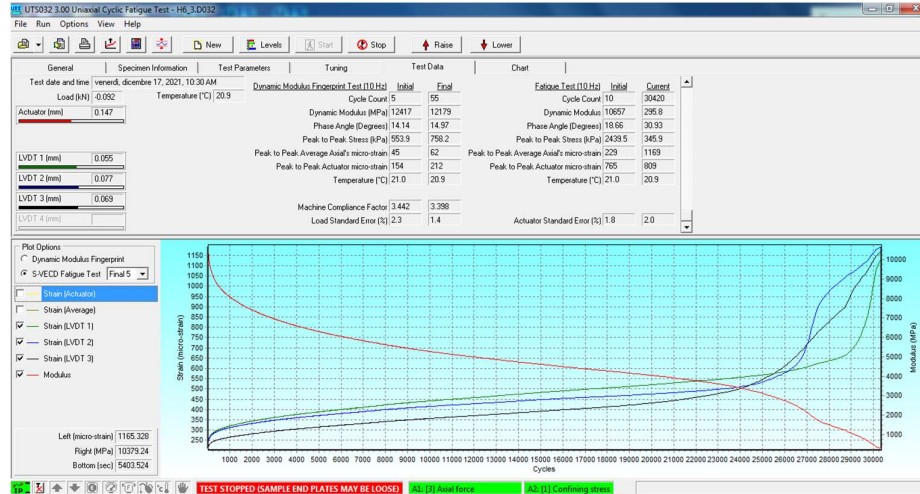


Figura 44- schermata di controllo test fatica - modulo complesso (in rosso) e deformazioni trasduttori (verde, blu e nero)

A questo è possibile avviare la prova a fatica. Vengono monitorati diversi parametri, quali il modulo complesso, l'angolo di fase e le deformazioni dei trasduttori [Figura 44]. La prova è valida se la rottura avviene tra 2000 e 80000 cicli di carico. Il test si ferma automaticamente dopo aver raggiunto il picco dell'angolo di fase ed è importante che per tutta la prova i trasduttori registrino un accumulo delle deformazioni. Se questo non fosse così potrebbe voler dire una rottura non corretta del provino, ovvero che la superficie di rottura è fuori dall'area di misura. La rottura che ci si aspetta è una *middle failure* cioè una rottura in mezzeria, se così non fosse, prenderebbe il nome di *end failure* cioè rottura in estremità [Figura 45].

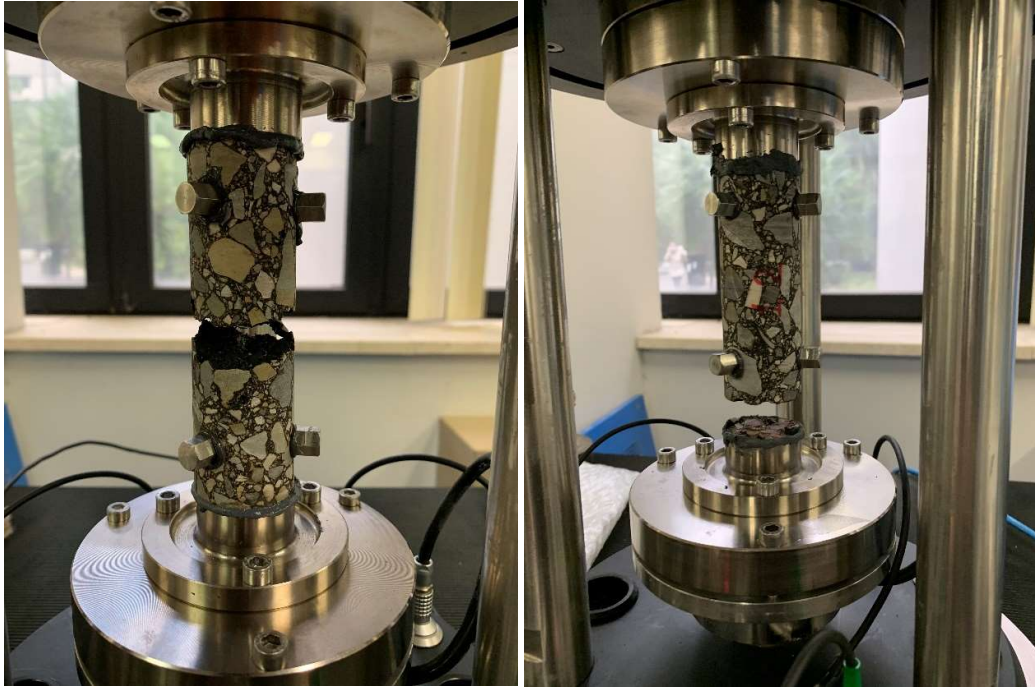


Figura 45 - A sinistra, una middle failure - A destra, una end failure

A questo punto è possibile esportare i file di output e rimuovere il provino.

Elaborazione

Nel presente progetto di tesi i risultati delle prove di fatica sono stati analizzati secondo metodo S-VECD (Simplified Viscoelastic Continuum Damage). Il modello si basa su tre principi teorici fondamentali:

1. il principio di corrispondenza elastica-viscoelastica;
2. la meccanica del danno applicata al continuo;
3. il principio di sovrapposizione tempo-temperatura in presenza di danno.

Il principio di corrispondenza elastica-viscoelastica permette di separare gli effetti legati al danno dagli effetti viscosi. Si sostituiscono le deformazioni fisiche (strain, ϵ) con le pseudo-deformazioni (pseudo-strain, ϵ^R), così da ridurre il problema viscoelastico ad un problema elastico, eliminando di fatto la tempo-dipendenza.

La meccanica del danno applicata al continuo considera il materiale come un corpo continuo ed omogeneo e studia la crescita del danno attraverso variabili di stato interne, permettendo di tener conto del deterioramento microstrutturale del materiale al livello globale.

Il principio di sovrapposizione tempo-temperatura in presenza di danno consente di tener conto dell'effetto combinato di tempo (velocità) di applicazione del carico e temperatura anche al di fuori del campo di linearità del comportamento del materiale.

Quindi si ha la necessità di quantificare tramite dei parametri la durabilità a fatica di un materiale. L'integrità di un materiale viene quantificata tramite la pseudo-rigidezza C definita come:

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R}$$

Dove:

σ = la tensione applicata

ε^R = pseudo-deformazione

La variabile di stato interna, invece, è il parametro di danno S :

$$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S}\right)^\alpha$$

Dove

W^R = è la funzione di densità dell'energia di pseudo-deformazione

α = il tasso di crescita del danno

La cosiddetta curva C-S o curva caratteristica del danno [Figura 46], è una proprietà intrinseca di un materiale. La relazione tra C e S è esprimibile tramite una funzione potenza nel modo seguente:

$$C = 1 - C_{11} \times S^{C_{12}}$$

Dove:

C_{11} , C_{12} sono i coefficienti del modello.

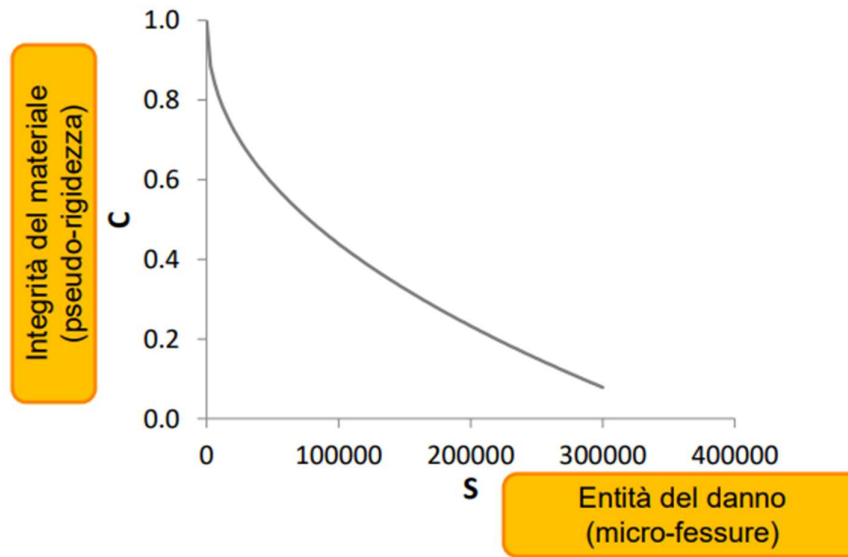


Figura 46- Curva caratteristica del danno

Nel caso in esame si applica il metodo S-VECD, semplificato dal punto di vista computazionale, che permette di ottenere la curva di fatica C-S attraverso prove cicliche di trazione combinate con prove di modulo complesso [11].

Tuttavia, la curva caratteristica del danno descrive come il danno cresce nel materiale, ma non permette di definire la rottura del materiale. A tal proposito, Wang e Kim [12], hanno introdotto un criterio di rottura basato sull'energia di pseudo-deformazione, noto come "criterio di rottura D^R ", in cui D^R è un parametro definito come la pendenza della relazione lineare tra la somma cumulativa di $(1-C)$ fino a rottura e il numero di cicli a rottura N_f .

La definizione di tale criterio è basata su osservazioni sperimentali che hanno evidenziato come la riduzione media della pseudo-rigidezza C fino a rottura sia indipendente dal modo in cui il materiale viene sollecitato, dalla temperatura e dal livello di carico, ovvero è una proprietà intrinseca del materiale. In particolare, da un punto di vista fisico, D^R rappresenta la resilienza del materiale, (i.e. la capacità di assorbire energia prima di fratturarsi).

Questo non può essere un metodo completo per caratterizzare il comportamento a fatica di una miscela bituminosa, poiché sia il modulo che la resilienza del materiale entrano in gioco nelle prestazioni della miscela in termini di fatica all'interno del pacchetto strutturale. Infatti, a parità di condizioni di carico, un materiale con un modulo maggiore è soggetto ad una deformazione inferiore rispetto ad un materiale con modulo più basso. Se la resilienza dei due materiali è simile, la vita utile a fatica è più lunga per la miscela più rigida o per via di un minor modello deformativo. Quindi, per tener conto di questi aspetti precedenti, è stato introdotto recentemente l'indice sintetico Sapp (apparent damage capacity) [13]:

$$S_{app} = 1000^{\left(\frac{\alpha}{2}-1\right)} \times \frac{a_T^{1/(\alpha+1)} \times \left(\frac{D^R}{C_{11}}\right)^{1/C_{12}}}{|E^*|^{\alpha/4}}$$

Dove:

α = tasso di crescita del danno

a_T = valore dello shift factor tempo-temperatura tra la temperatura alla quale va calcolato il S_{app} e la temperatura di riferimento considerata per costruire la curva maestra del modulo complesso;

$|E^*|$ = valore del modulo complesso (in kPa) alla temperatura alla quale va calcolato il S_{app} per una frequenza pari a $62.8 \cdot a_T$;

$C11$ e $C12$ = coefficienti della curva caratteristica del danno

D^R = pendenza della relazione lineare tra la somma $(1-C)$ fino a rottura e il numero di cicli a rottura.

La temperatura alla quale va calcolato il S_{app} è la temperatura media del Performance-Grade (PG) climatico -3 °C. Il PG climatico si riferisce quindi non al bitume della miscela ma alle temperature a cui la pavimentazione sarà sottoposta durante la sua vita utile. Il sito di costruzione, come già scritto, si trova ad Orte-Fiano Romano, vicino Viterbo nel Lazio. Il Prof. Giuliani dell'Università di Parma determinò una mappa dei PG italiani [Figura 47] [13], da cui si ottiene che il PG climatico è 58-10. La temperatura del S_{app} è quindi pari a $(58-10)/2-3=21$ °C.

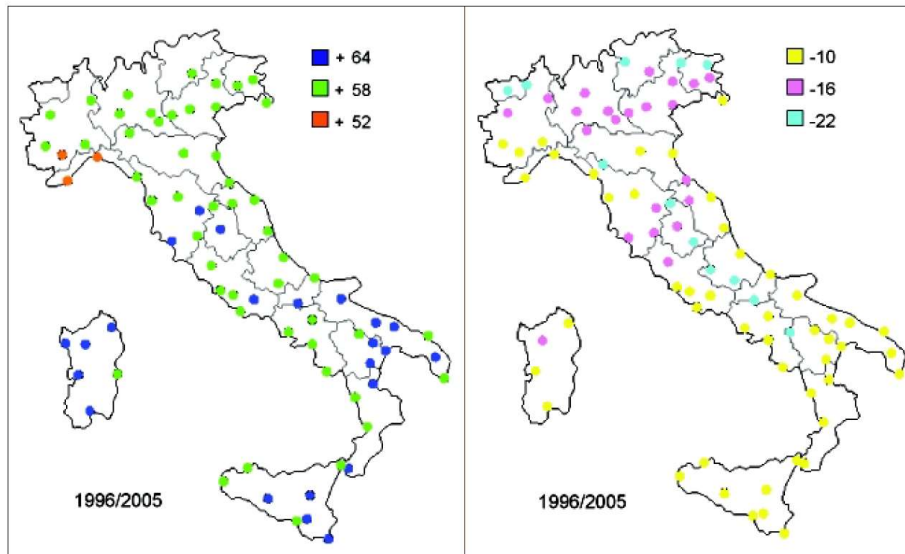


Figura 47- Mappa dei PG (max a sinistra, min a destra) dei bitumi stradali in Italia [14]

D'altronde, il foglio di calcolo FlexMAT ha come database delle condizioni climatiche solo città statunitensi. Pertanto, si è dovuto assimilare il clima (temperature annue, piogge) e il PG climatico ad una città presente nel database. Il sito di riferimento è risultato essere Rio del Mar (Santa Cruz), in California [Tabella 5].

State	CA
City (County)	Rio del Mar (Santa Cruz)
City Coordinates (Lat/Long)	36.9608 / -121.8808
Nearest Station (Lat/Long)	37 / -121.88
Climate PG	58-10
Sapp Temperature (°C)	21

Tabella 5 - Sito di riferimento PG

I risultati delle prove di fatica possono essere facilmente elaborati per ottenere tutte le grandezze menzionate in precedenza utilizzando FlexMAT™ Cracking, un foglio di calcolo appositamente sviluppato dal gruppo di ricerca della NCSU.

I risultati della sperimentazione sono riportati nel capitolo §4.

Capitolo 4 – Risultati ed analisi

Nel seguente capitolo vengono descritti i risultati delle prove effettuate sui provini ricavati da carote con due differenti miscele, WMA e HMA. In particolare, come descritto nel capitolo precedente i provini sono stati testati in base al loro strato di provenienza e dalla tipologia di miscela utilizzata. I provini sono stati testati a prove di modulo complesso e a prove a fatica a trazione diretta ciclica; il macchinario utilizzato è stato l'AMPT.

Applicando il metodo S-VECD si sono ottenute le curve C-S di ogni miscela ed il suo relativo S_{app} .

Nei paragrafi successivi verranno illustrati i risultati con un confronto finale tra le miscele.

4.1 Caratterizzazione delle miscele

Di seguito verranno riportati i valori e i risultati delle caratterizzazioni effettuate in laboratorio.

4.1.1 Percentuale di bitume

Di seguito in tabella [Tabella 6] sono elencate le percentuali di bitume, medie di due ripetizioni per miscela, derivanti da estrazione con solvente. Il contenuto di bitume nel binder è dello 0.5 % superiore rispetto alla base, confermando le percentuali previste da progetto.

Materiale	% bitume, miscela	% bitume, aggregati
Binder_carota 1	4.5	4.70
Binder_carota 2	4.4	4.7
Base_carota 1	3.9	4.1
Base_carota 4	4.1	4.3

Tabella 6- Percentuale contenuto bitume rispetto alla miscela, rispetto agli aggregati

4.1.2 Analisi granulometrica

Di seguito si riportano le curve granulometriche dello strato di binder [Figura 48] e dello strato di base [

Figura 49] per poi metterli a confronto. Si è notato che le curve si sovrappongono [Tabella 7, Figura 50]. Quindi, anziché utilizzare due curve granulometriche differenti, una per il binder e una per la base con aggregati di maggiore pezzatura, è stata adottata una sola curva granulometrica intermedia tra le due.

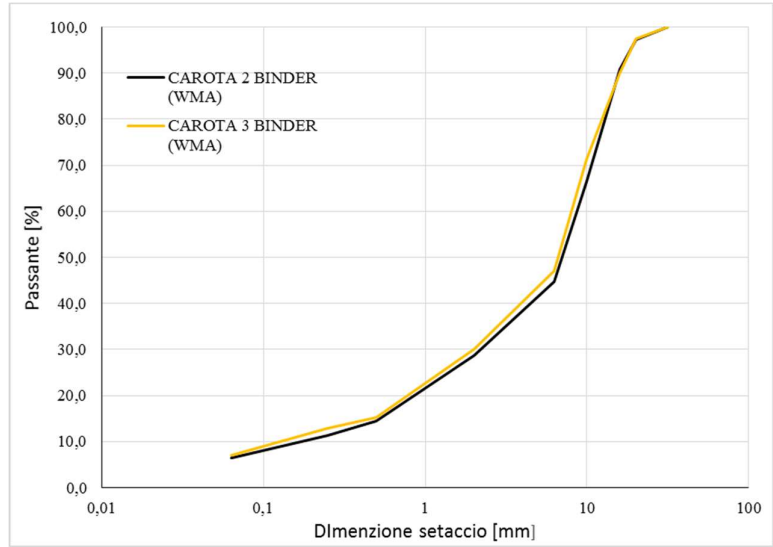


Figura 48- Curva granulometrica binder

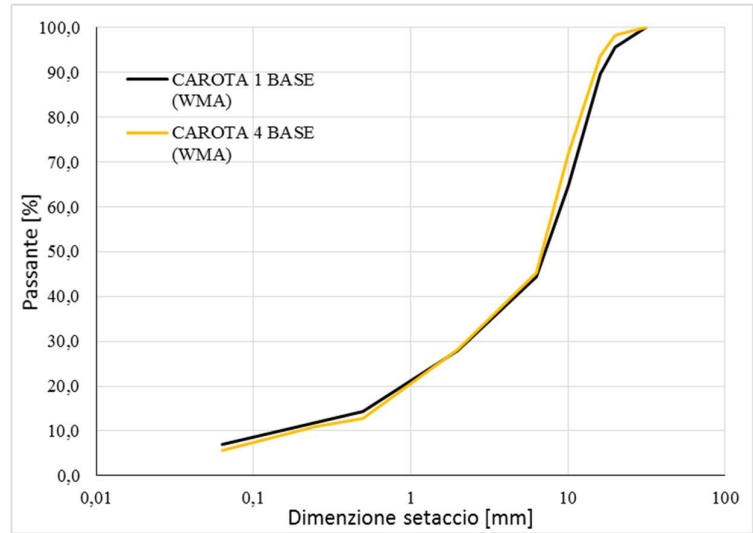


Figura 49- Curva granulometrica base

Setacci	Passanti [%]			
	Binder_carota 2	Binder_carota 3	Base_carota 1	Base_carota 4
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
20	97,3	97,4	95,6	98,2
16	90,8	90,1	89,7	93,7
10	66,3	71,3	64,7	71,7
6,3	44,7	47,0	44,4	45,3
2	28,7	30,0	27,8	28,2
0,5	14,4	15,2	14,3	12,8
0,25	11,3	12,9	11,8	11,0
0,063	6,5	6,9	7,0	5,7

Tabella 7- Passanti percentuali confronto tra binder e base

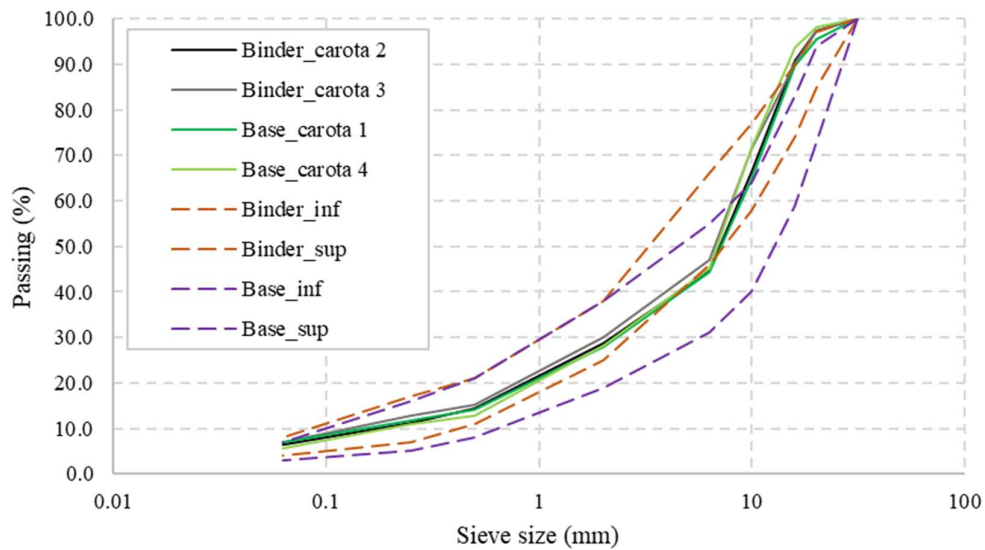


Figura 50- Confronto Binder – Base

È possibile osservare dal confronto tra le curve granulometriche ottenute in laboratorio tramite setacciatura e i fusi di base e binder da capitolato (Figura 50) che l'assortimento granulometrico utilizzato è intermedio tra una base e un binder.

4.1.3 Massa volumica

Nel seguente paragrafo è possibile osservare i risultati ottenuti sulla massa volumica degli aggregati [Tabella 8], media di quattro ripetizioni per carota (due per materiale grosso e due per materiale fino).

Assumendo la massa volumica del bitume pari a 1.02 g/cm^3 ed utilizzando le percentuali di bitume rispetto la miscela da estrazione, si è ottenuta la massa volumica della miscela. La piccola differenza tra strato di base e strato di binder è dovuta alla diversa percentuale di bitume e al diverso contenuto di RAP (25% nel binder e 30% nella base).

Materiale	% bitume, miscela	$\rho_{\text{aggr,app}} [\text{g/cm}^3]$	$\rho_{\text{bitume}} [\text{g/cm}^3]$	$\rho_{\text{max,miscela}} [\text{g/cm}^3]$	$\rho_{\text{max,miscela}} [\text{g/cm}^3]$ MEDIA
Binder_carota 1	4,5	2,718	1,02	2,529	2,527
Binder_carota 2	4,4	2,712	1,02	2,526	
Base_carota 1	3,9	2,705	1,02	2,539	2,533
Base_carota 4	4,1	2,697	1,02	2,527	

Tabella 8- Massa volumica massima

4.1.3 Contenuto di vuoti

Di seguito sono riportati i vuoti misurati con pesate a superficie satura asciutta dei singoli provini, a confronto per strato di binder [Tabella 9] e strato di base [Tabella 10].

MISCELA	CAROTA	%vuoti	% vuoti media
WMA BINDER	1	3,6	4,1
		4,5	
		4,2	
	3	3,7	4,1
		4,1	
		4,5	
HMA BINDER	4	3,9	4,5
		4,5	
		5,0	
	5	4,7	4,6
		4,3	
		4,9	
	6	5,6	5,3
		5,5	
		4,8	

Tabella 9- Confronto vuoti strato di binder

MISCELA	CAROTA	%vuoti	% vuoti media	
WMA BASE	1	8,7	7,0	
		6		
		6		
		8,9		
		5,5		
		7,1		
	2	2,6	2,6	
		1,9		
		2		
		4		
	3	3	3,7	
		4,6		
		4,5		
		3,7		
		4,4		
		2,2		
	HMA BASE	4	6,3	6,6
			6,5	
6,4				
6,7				
6,5				
5		7,3	5,1	
		5,2		
		5,5		
		4,2		
		4,8		
6		5,4	8,2	
		5,4		
		9,0		
		6,5		
		7,6		
		7,3		
		12,2		
		6,6		

Tabella 10-Confronto vuoti strato di base

Si osserva per lo strato di binder i vuoti di entrambe le miscele sono simili e pari al 4.3%.

Diversamente, per lo strato di base i vuoti delle carote della stessa miscela sono diversi, denotando una non omogeneità. La carota 1 di WMA è infatti più aperta, rispetto la 2 e la 3 che hanno vuoti pari al 3.0%. Tale aspetto è probabilmente dovuto alle operazioni di compattazione, in cui la temperatura è di fondamentale importanza: un abbassamento di temperatura (essendo già attorno ai 120 °C) va ad inficiare la compattabilità della miscela. Per quanto riguarda l'HMA, la carota 6 è più aperta; anche visivamente erano evidenti fenomeni di segregazione.

Confrontando i vuoti medi di HMA e WMA base, si evidenzia la migliore compattabilità del conglomerato tiepido, che ha raggiunto vuoti compatibili con le tipiche prescrizioni da Capitolo (5%) nonostante la minore temperatura di produzione. Ciò è probabilmente dovuto anche all'additivo chimico aggiunto che ne aumenta la lavorabilità.

4.2 Prove di modulo complesso

Si è misurato a varie frequenze e a varie temperature il modulo dinamico del materiale sottoposto a cicli di compressione. In questo paragrafo si analizzano i risultati ottenuti: in primo luogo verrà analizzata l'affidabilità delle prove eseguite, poi nello specifico si commentano la curva maestra del modulo complesso di immagazzinamento (ovvero la componente elastica), la curva maestra dell'angolo di fase ed infine i diagrammi di "Cole-Cole" e "Black". Questi ultimi sono fondamentali per la caratterizzazione del comportamento viscoelastico di un materiale; infatti, la continuità dei dati sperimentali a varie temperature in questi diagrammi implica che il materiale ha un comportamento termo-reologicamente semplice.

4.2.1 Ripetibilità delle prove di modulo

È stata analizzata la ripetibilità delle prove di modulo complesso, ovvero si è valutato se i risultati di modulo ottenuti da provini diversi di una stessa miscela e strato di provenienza siano confrontabili tra loro, e quindi significativi. L'AASHTO TP 378 [2] al tal fine definisce due indici di ripetibilità basati sui valori medi di modulo dinamico ed angolo di fase ad ogni singola frequenza e temperatura, e alla dimensione massima dell'aggregato.

La normativa AASHTO TP 378: [2] l'indice $s_r\%$ il coefficiente di ripetibilità del modulo dinamico $|E^*|$:

$$s_r\% = [29.8e^{(0.014 \times NMAS)}] \times |E^*|^{-[0.189e^{(0.012 \times NMAS)}]}$$

Dove:

$s_r\%$ = coefficiente di ripetibilità del modulo dinamico $|E^*|$

$NMAS$ = massima dimensione dell'aggregato nella miscela in mm

$|E^*|$ = media del modulo dinamico [MPa]

Introduce un indice s_r per la ripetibilità dell'angolo di fase:

$$s_r = [4.67e^{(0.022 \times NMAS)}] \times |E^*|^{-0.23}$$

Dove:

s_r = è la deviazione standar dell'angolo di fase in gradi [°]

$NMAS$ = massima dimensione dell'aggregato nella miscela in [mm]

$|E^*|$ = media del modulo dinamico in [MPa]

Oltre a questi due indici di ripetibilità, tra tre o più ripetizioni di prova vanno valutati sempre per ogni singola frequenza e temperatura di prova:

- La massima differenza dal valore medio del modulo complesso (nei grafici a seguire denominata *% of average*);
- La massima differenza dal valore medio dell'angolo di fase (nei grafici a seguire denominata *max phase angle difference*).

I limiti sono tabellati [2] [Figura 51] e dipendono dal NMA della miscela, dal valore del modulo e dal numero di provini testati (se si testa un maggior numero di provini, è consentita una maggiore dispersione).

L'NMA per il presente studio è pari a 19 mm, come ottenuto da analisi granulometrica. Il numero di provini minimo da testare è di tre. D'altronde, per lo strato di HMA base sono stati testati quattro provini, e per lo strato di WMA base cinque.

Nominal Maximum Aggregate Size, mm	Average $ E^* $, MPa	Dynamic Modulus						Phase Angle					
		s_r , %	Acceptable Range for n Specimens, % of Average					s_r , °	Acceptable Range for n Specimens, degrees				
			$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$		$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
9.5	≥137 to <200	15	43	51	55	60	61	1.8	5.1	6.0	6.5	7.1	7.3
9.5	≥200 to <500	13	36	42	46	50	51	1.5	4.2	4.9	5.4	5.8	6.0
9.5	≥500 to <1000	11	31	36	39	43	44	1.3	3.5	4.1	4.5	4.9	5.0
9.5	≥1000 to <2000	9	26	31	34	37	38	1.1	3.0	3.5	3.8	4.2	4.3
9.5	≥2000 to <5000	8	22	26	28	31	31	0.9	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5
9.5	≥5000 to <10 000	7	19	22	24	26	27	0.7	2.1	2.4	2.6	2.9	2.9
9.5	≥10 000 to <16 400	6	16	19	21	23	23	0.6	1.8	2.1	2.3	2.4	2.5
12.5	≥137 to <200	17	47	55	60	65	67	1.9	5.4	6.4	7.0	7.6	7.8
12.5	≥200 to <500	14	39	46	50	54	55	1.6	4.5	5.3	5.7	6.2	6.4
12.5	≥500 to <1000	12	33	39	42	46	47	1.3	3.7	4.4	4.8	5.2	5.3
12.5	≥1000 to <2000	10	28	33	36	39	40	1.1	3.2	3.8	4.1	4.4	4.6
12.5	≥2000 to <5000	8	23	28	30	33	33	0.9	2.6	3.1	3.4	3.7	3.7
12.5	≥5000 to <10 000	7	20	23	25	28	28	0.8	2.2	2.6	2.8	3.1	3.1
12.5	≥10 000 to <16 400	6	17	20	22	24	24	0.7	1.9	2.2	2.4	2.6	2.7
19	≥137 to <200	20	56	66	72	78	80	2.2	6.3	7.4	8.1	8.7	9.0
19	≥200 to <500	16	46	54	59	64	65	1.8	5.2	6.1	6.6	7.2	7.4
19	≥500 to <1000	14	38	45	49	53	55	1.5	4.3	5.1	5.6	6.0	6.2
19	≥1000 to <2000	12	32	38	42	45	46	1.3	3.7	4.3	4.7	5.1	5.3
19	≥2000 to <5000	9	27	31	34	37	38	1.1	3.0	3.6	3.9	4.2	4.3
19	≥5000 to <10 000	8	22	26	28	31	32	0.9	2.5	3.0	3.3	3.5	3.6
19	≥10 000 to <16 400	7	19	22	24	26	27	0.8	2.2	2.6	2.8	3.0	3.1
25	≥137 to <200	24	66	78	85	92	94	2.6	7.2	8.4	9.2	10.0	10.2
25	≥200 to <500	19	53	62	68	74	76	2.1	5.9	6.9	7.6	8.2	8.4
25	≥500 to <1000	16	44	51	56	61	62	1.8	4.9	5.8	6.4	6.9	7.1
25	≥1000 to <2000	13	37	43	47	51	52	1.5	4.2	5.0	5.4	5.9	6.0
25	≥2000 to <5000	11	29	35	38	41	42	1.2	3.5	4.1	4.5	4.8	4.9
25	≥5000 to <10 000	9	24	29	31	34	35	1.0	2.9	3.4	3.7	4.0	4.1
25	≥10 000 to <16 400	7	20	24	26	28	29	0.9	2.5	2.9	3.2	3.4	3.5

Note: AMPT calibrated range is 137 MPa to 16 400 MPa.

Figura 51- Limiti per modulo dinamico e angolo di fase in funzione del NMA e numero di prove

HMA Binder

Di seguito vengono riportati gli istogrammi con i valori di Sr% sul modulo delle prove alle varie frequenze e temperature del HMA binder.

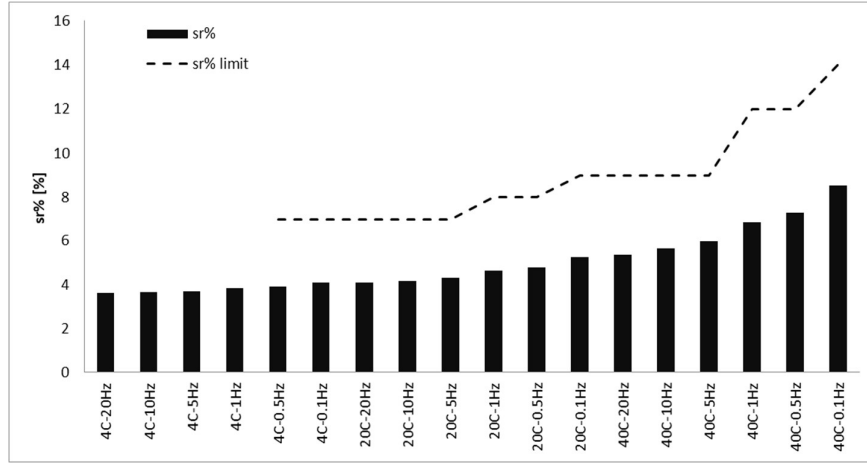


Figura 52 - Sr % HMA binder

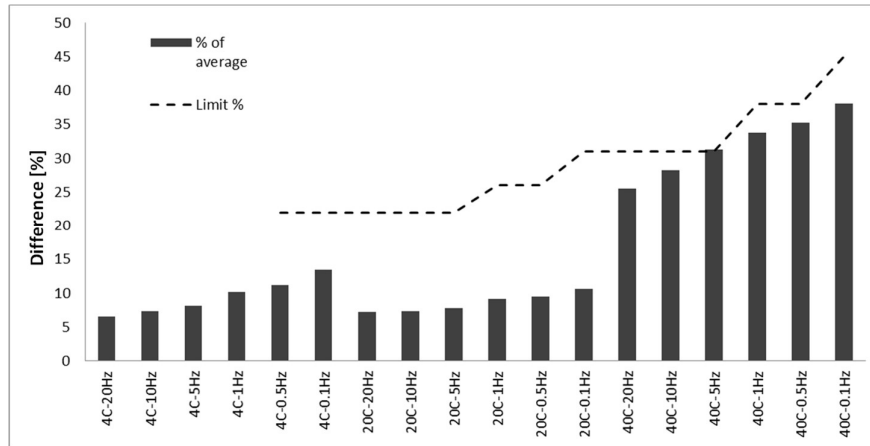


Figura 53 – Differenza dal valore medio del modulo complesso HMA binder

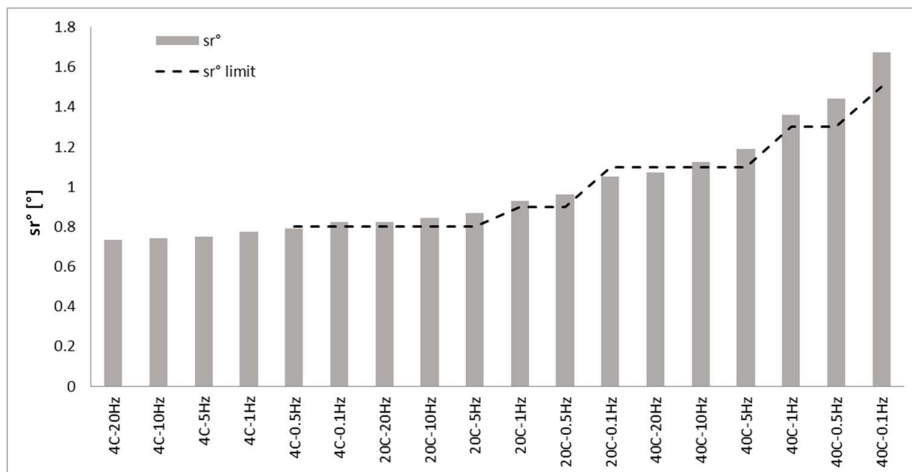


Figura 54- Sr° angolo di fase HMA binder

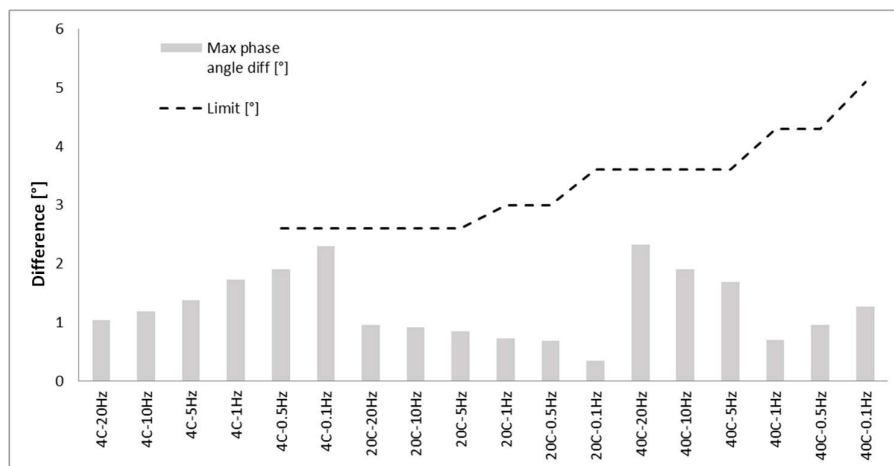


Figura 55 - Differenza dal valore medio dell'angolo di fase HMA binder

Come è possibile vedere dai grafici sopra illustrati, per quanto riguarda la ripetibilità del modulo dinamico i valori risultano entro i limiti di normativa [Figura 52]. Diversamente, per l'angolo di fase i valori di Sr° ottenuti sono vicini ai valori limite; d'altronde è possibile accettare questi risultati [Figura 54].

HMA Base

Di seguito i grafici che illustrano i limiti del HMA base:

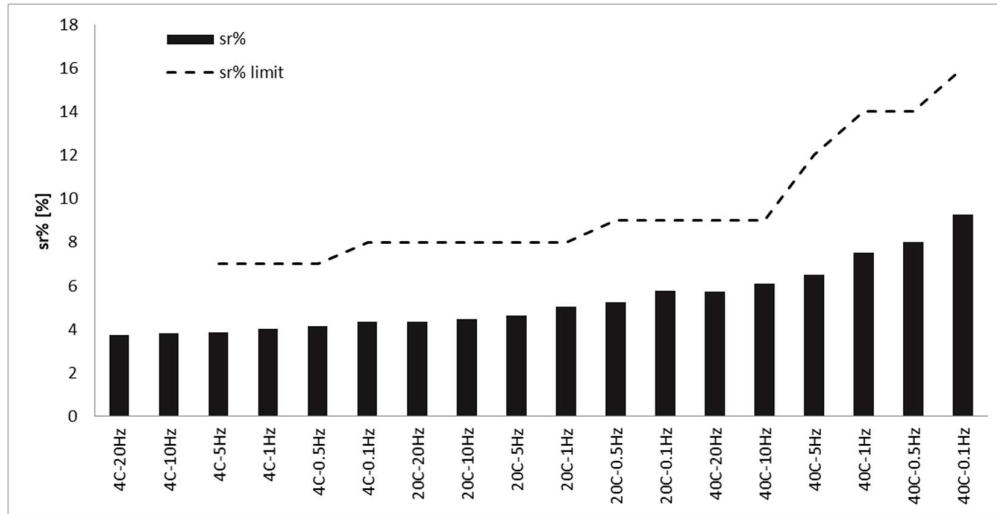


Figura 56 - sr% HMA base

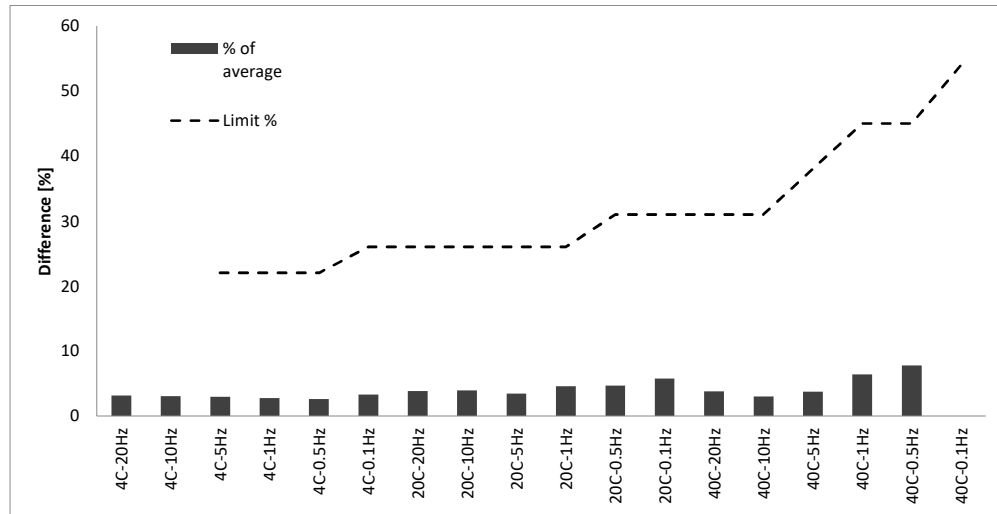


Figura 57 - Differenza dal valore medio del modulo complesso HMA base

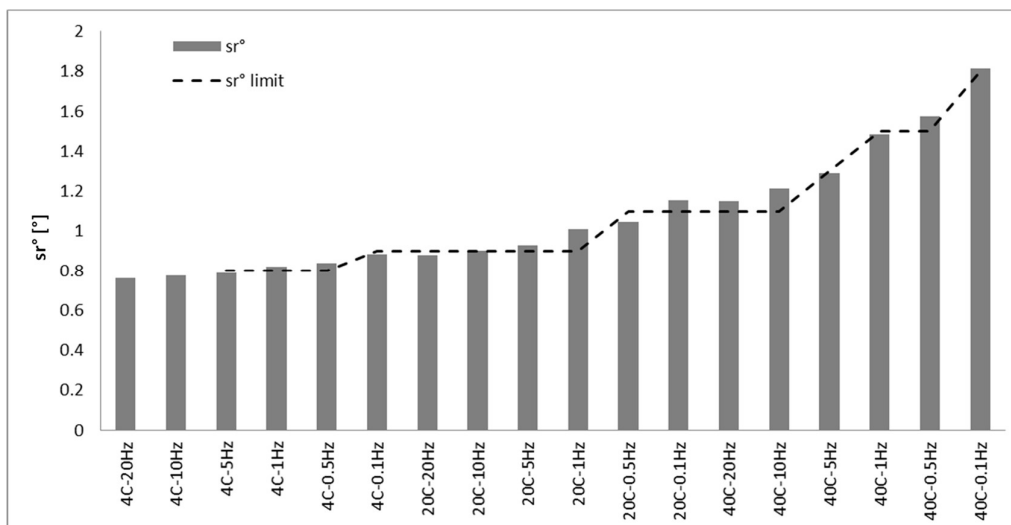


Figura 58 - Sr° angolo di fase HMA base

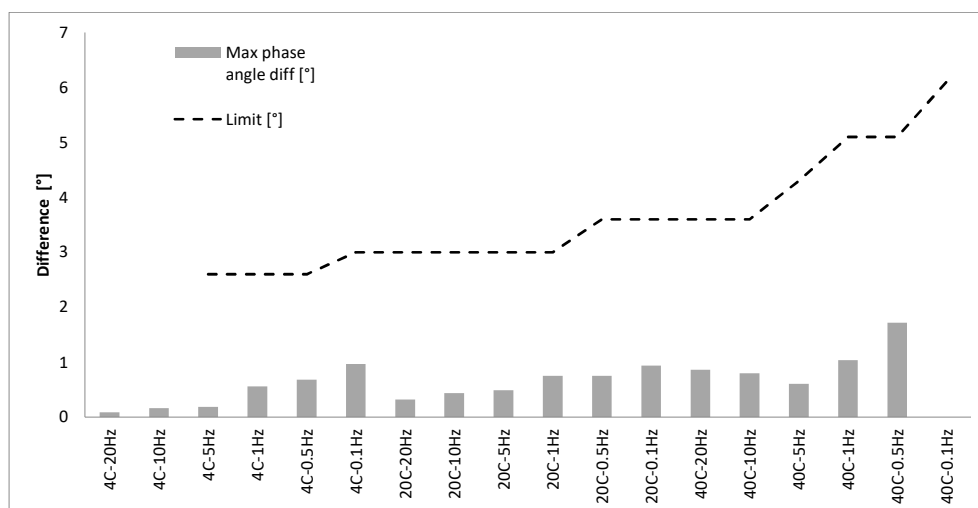


Figura 59 - Differenza dal valore medio dell'angolo di fase HMA base

È possibile commentare i seguenti grafici in linea con il binder [Figura 56, Figura 57, Figura 58, Figura 59], avendo l'indice di ripetibilità sotto il limite per il modulo dinamico, mentre per l'angolo di fase non rientra nei limiti, ma come già detto per il binder, è un limite molto restrittivo.

Si sottolinea che dei tre provini testati, su solamente uno è stato possibile eseguire la frequenza di 0.1 Hz a 40°C, a causa della troppo bassa rigidità (400 MPa). Pertanto, la differenza dal valore medio del modulo e dell'angolo perdono di significato, quindi ci sono valori nulli in Figura 57 e Figura 59.

WMA Binder

Di seguito i grafici del WMA binder:

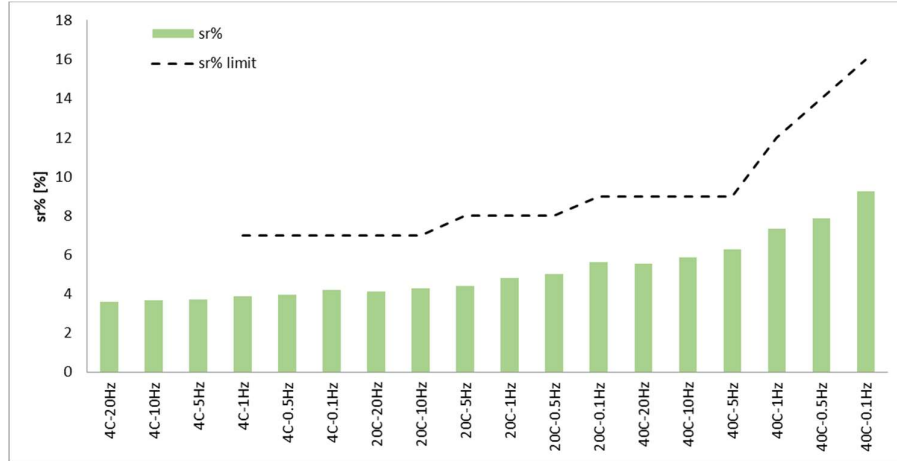


Figura 60 - sr% WMA binder

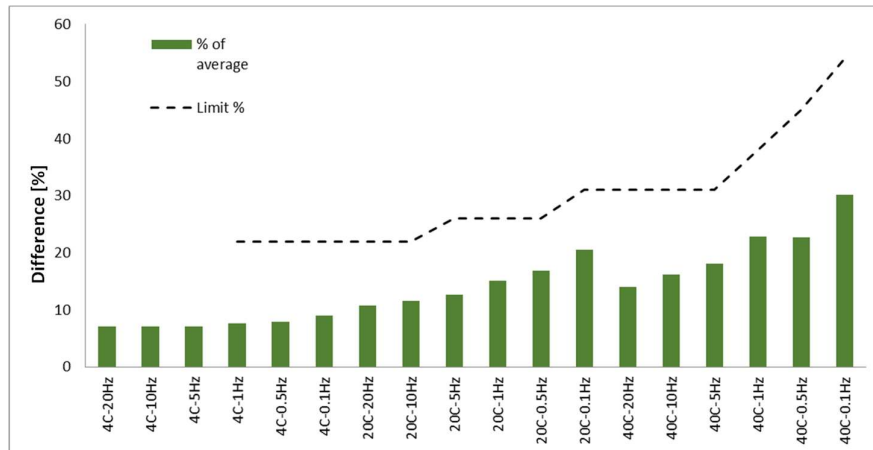


Figura 61 - Differenza dal valore medio del modulo complesso WMA binder

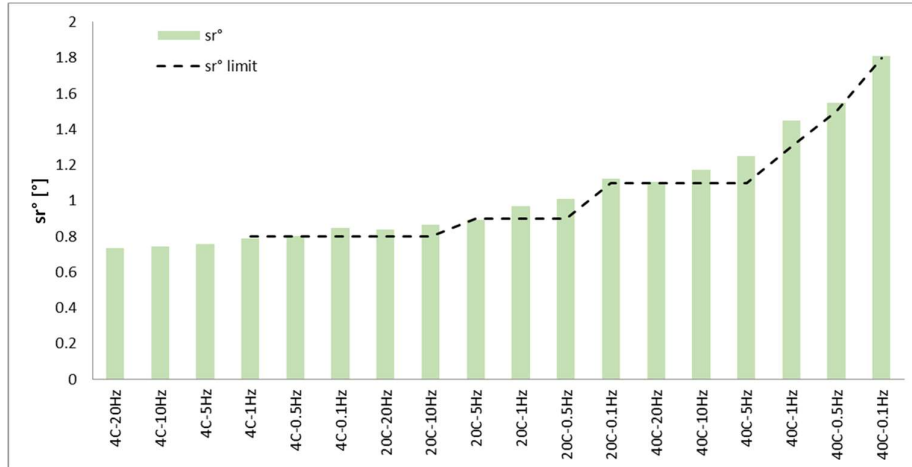


Figura 62 - sr% angolo di fase WMA binder

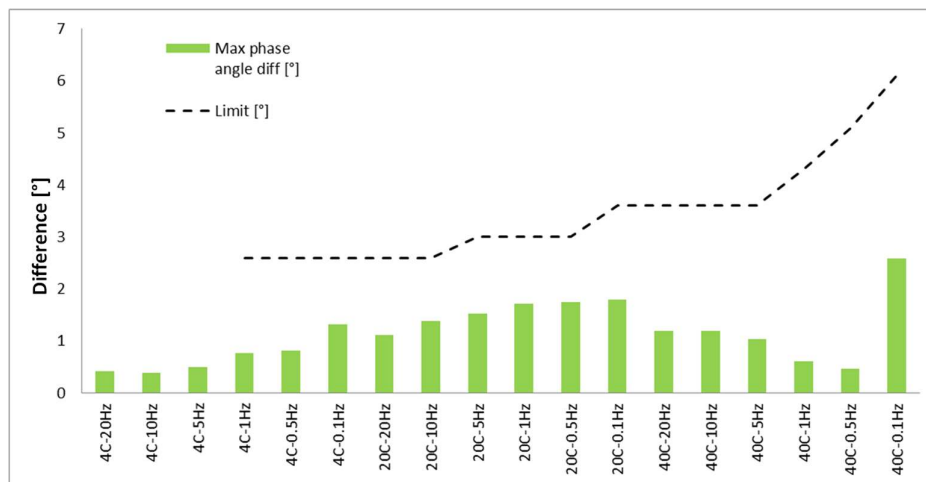


Figura 63 - Differenza dal valore medio dell'angolo di fase WMA binder

Nei grafici [Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63] dove nell'istogramma sono rappresentati i valori di Sr, con linea tratteggiata nera invece sono rappresentati i limiti. Come per HMA i limiti sono rispettati per il modulo dinamico ma non per l'angolo di fase.

WMA Base

Di seguito riportati i risultati sulla ripetibilità del WMA Base

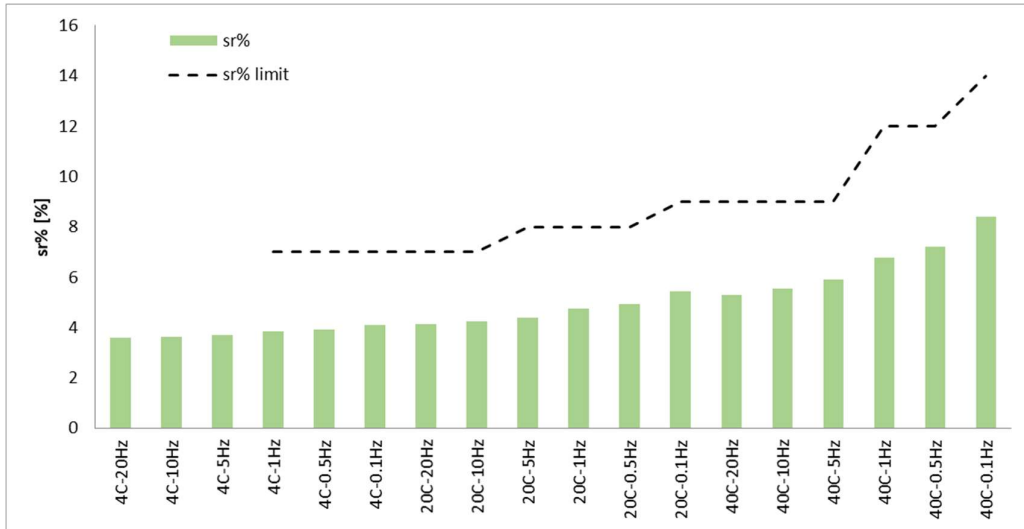


Figura 64- sr% WMA base

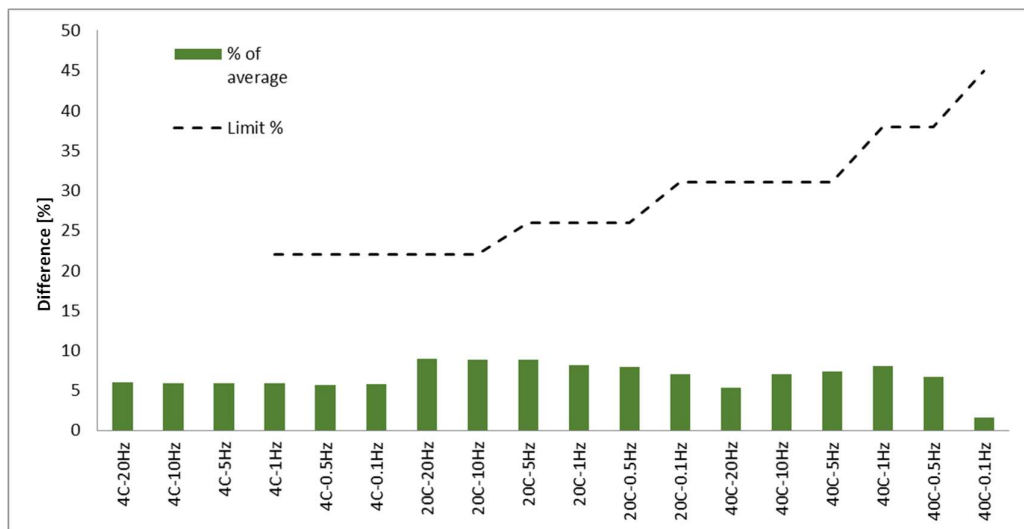


Figura 65 - Differenza dal valore medio del modulo complesso WMA base

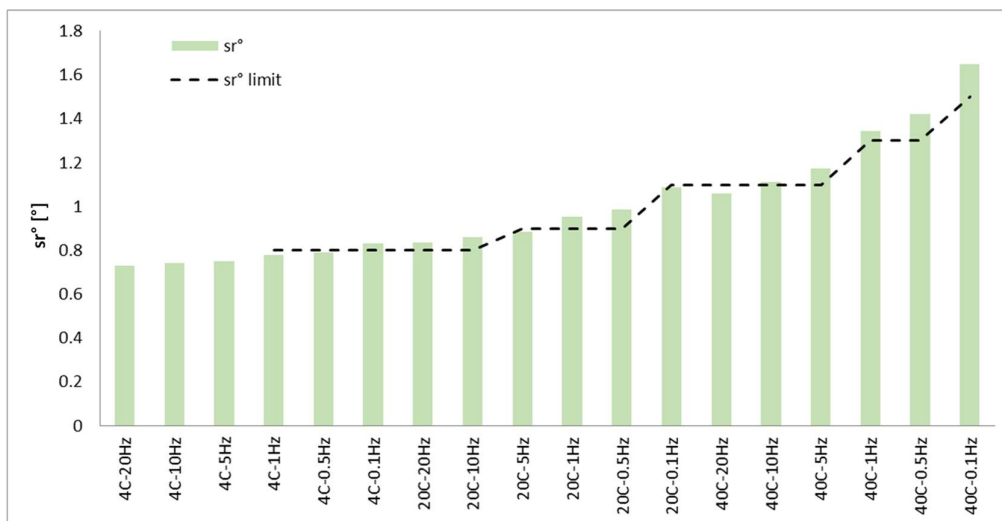


Figura 66 - sr° angolo di fase WMA base

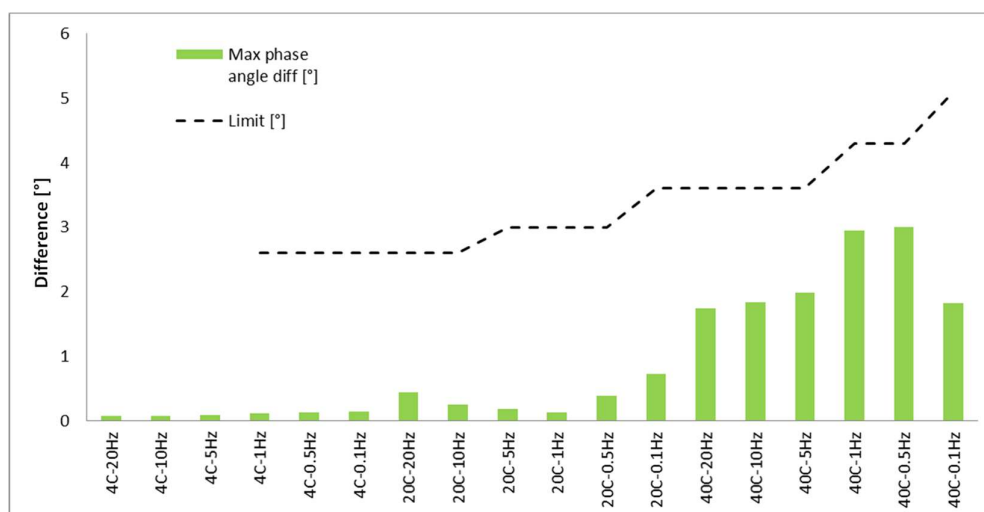


Figura 67 - Differenza dal valore medio dell'angolo di fase WMA base

Come per le altre miscele è possibile commentare i grafici [Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67] osservando che l'indice di ripetibilità $sr\%$, rientra nei limiti per quanto riguarda il modulo dinamico, mentre l'indice di ripetibilità sr° è poco fuori range per l'angolo di fase.

4.2.2 HMA Binder

I risultati ottenuti su tre provini hanno permesso di ricavare le curve maestre del modulo complesso [Figura 69] e dell'angolo di fase [Figura 68]. Le considerazioni vanno sempre fatte tenendo in conto la percentuale di vuoti [Tabella 11] di ogni provino testato (evidenziati). Si può notare come la differenza in termini di contenuto di vuoti sia minima tra le diverse carote della miscela a caldo.

MISCELA	CAROTA	%vuoti	% vuoti media
HMA BINDER	4	3.9	4.5
		4.5	
		5.0	
	5	4.7	4.6
		4.3	
		4.9	
	6	5.6	5.3
		5.5	
		4.8	

Tabella 11- % Vuoti HMA Binder

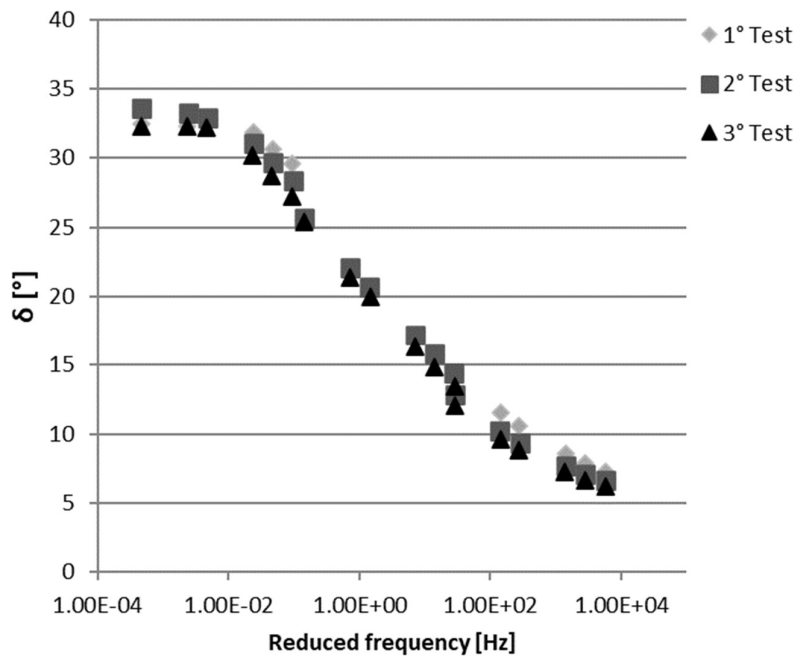


Figura 68- Curva maestra angolo di fase HMA Binder

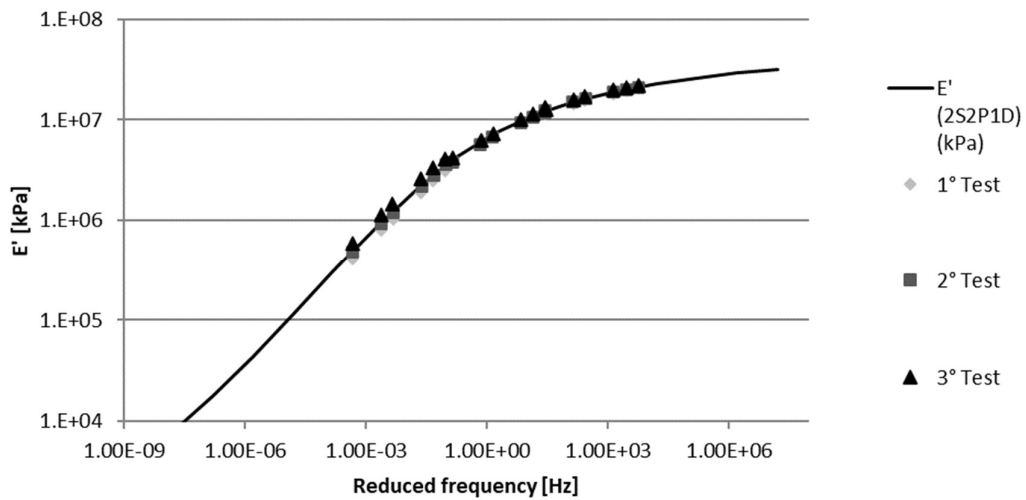


Figura 69- Curva maestra Modulo complesso E1 HMA Binder

Nel grafico sopra citato è messo a confronto il modello 2S2P1D con i dati sperimentali mediati, ed è possibile notare la sovrapposizione dei punti. La realizzazione di una curva maestra è possibile utilizzando una determinata prova a varie temperature e frequenze e poi traslare i risultati grazie agli shift Factors [Figura 70].

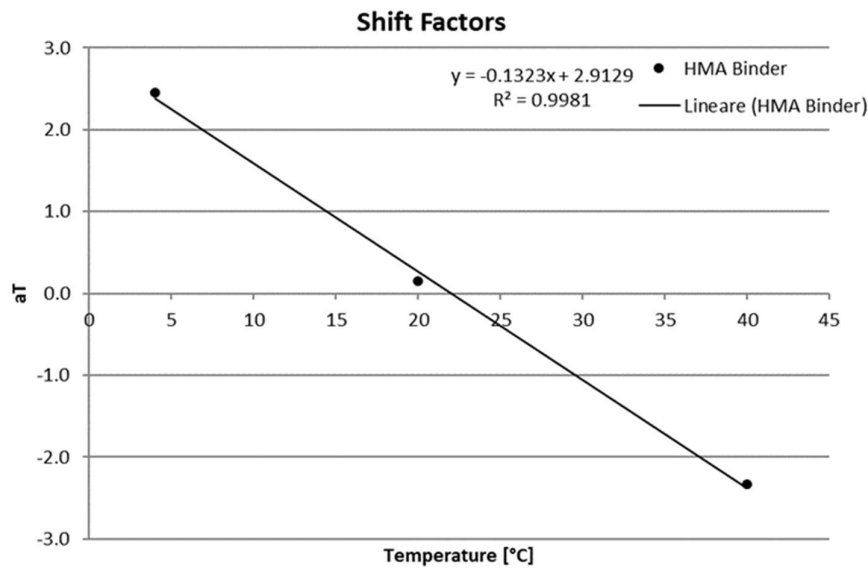


Figura 70- Shift Factors HMA Binder

Il grafico sopra citato [Figura 70] è facilmente interpretabile: più un materiale è termo-dipendente, tanto più la pendenza della retta aumenterà; al contrario diminuirà se il materiale è meno dipendente da quest'ultima.

Per valutare se il comportamento del materiale è termo-reologicamente semplice, si osservano il diagramma di Black [Figura 71] e di Cole-Cole [Figura 72] costruiti per i valori medi.

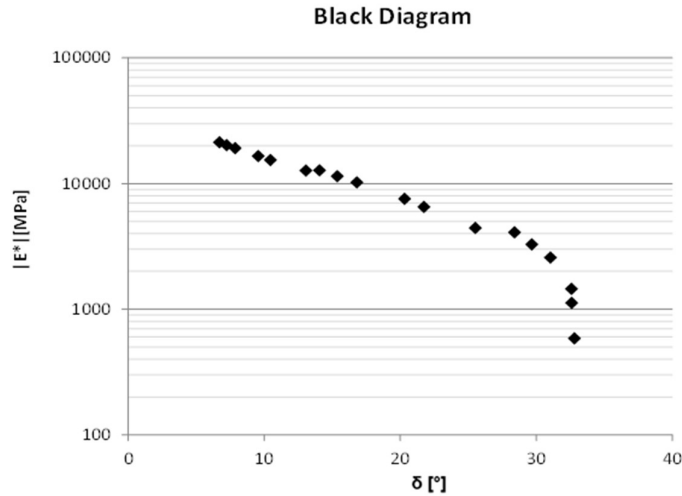


Figura 71- Diagramma di Black HMA Binder

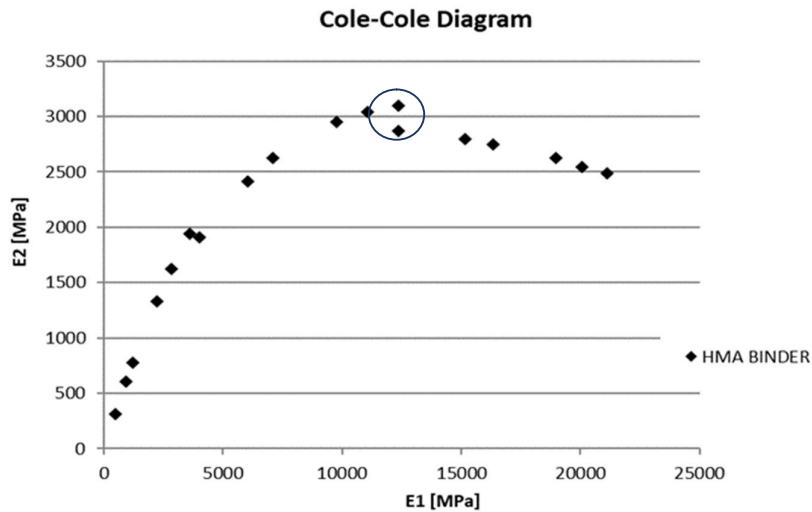


Figura 72- Diagramma di Cole-Cole HMA Binder

Come è possibile vedere dai due diagrammi, il materiale ha un comportamento termo-reologicamente semplice. Nel diagramma di Cole-Cole è possibile notare una non continuità delle due serie di valori tra i 4 e i 20 °C [Figura 72]; questo salto, comunque poco rilevante, è dovuto alla rappresentazione lineare e non in scala logaritmica.

4.2.3 WMA Binder

Per quanto riguarda lo strato di binder realizzato con tecnologia tiepida, di seguito si elencano i vari risultati sempre confrontati con la percentuale di vuoti [Figura 73].

MISCELA	CAROTA	%vuoti	% vuoti media
WMA BINDER	1	3.6	4.1
		4.5	
		4.2	
	3	3.7	4.1
		4.1	
		4.5	

Figura 73- % Vuoti WMA Binder

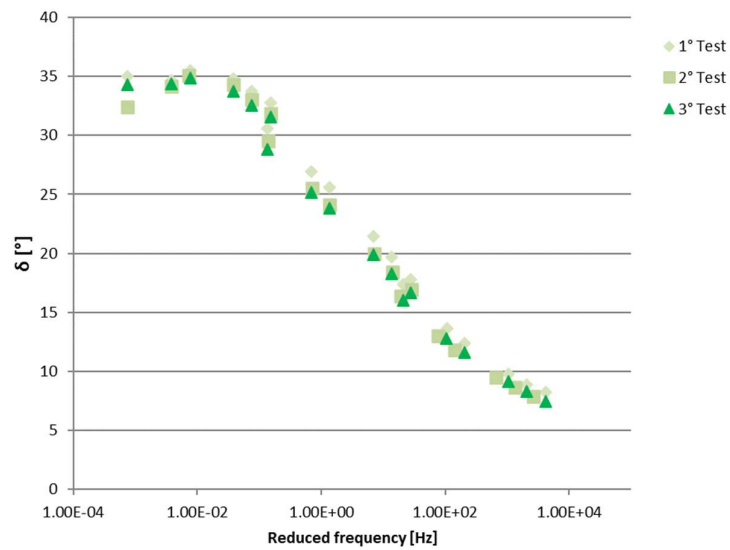


Figura 74 - Curva Maestra angolo di fase WMA Binder

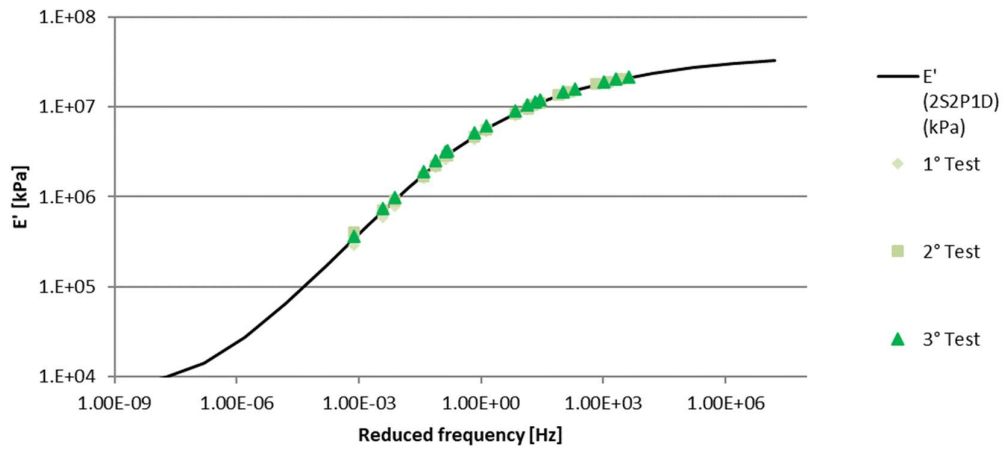


Figura 75- Curva maestra modulo complesso E1 WMA Binder

Come nel precedente caso anche per il WMA binder si ha una sovrapposizione tra valori sperimentali e modello 2S2P1D [Figura 75].

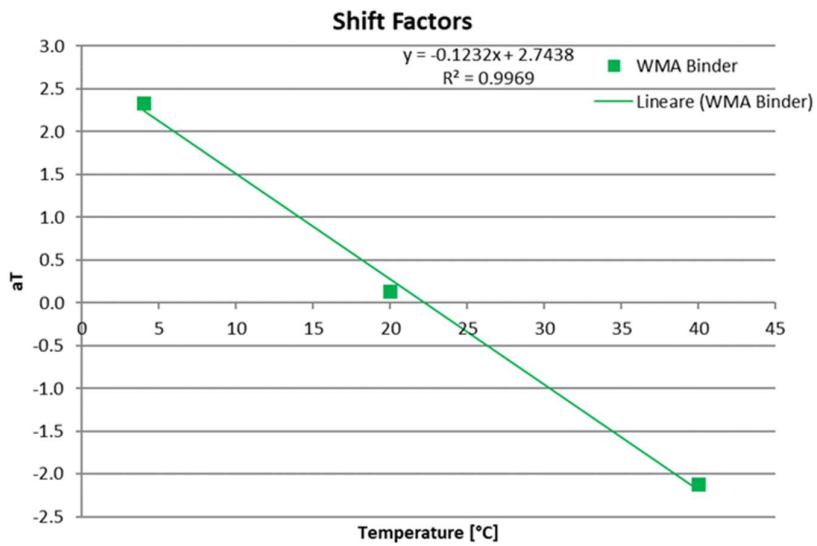


Figura 76- Shift factors WMA Binder

Per studiare il comportamento termo-reologico del materiale si analizzano i grafici di Black [Figura 77] e Cole-Cole [Figura 78].

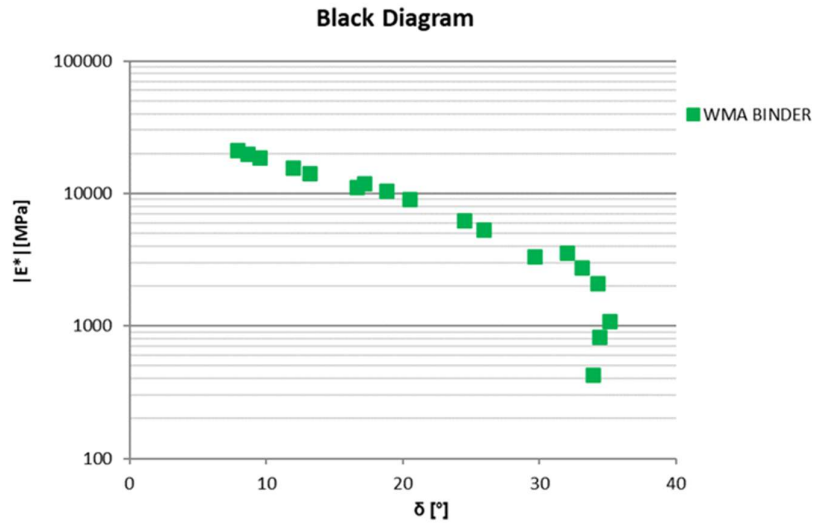


Figura 77 - Diagramma di Black WMA Binder

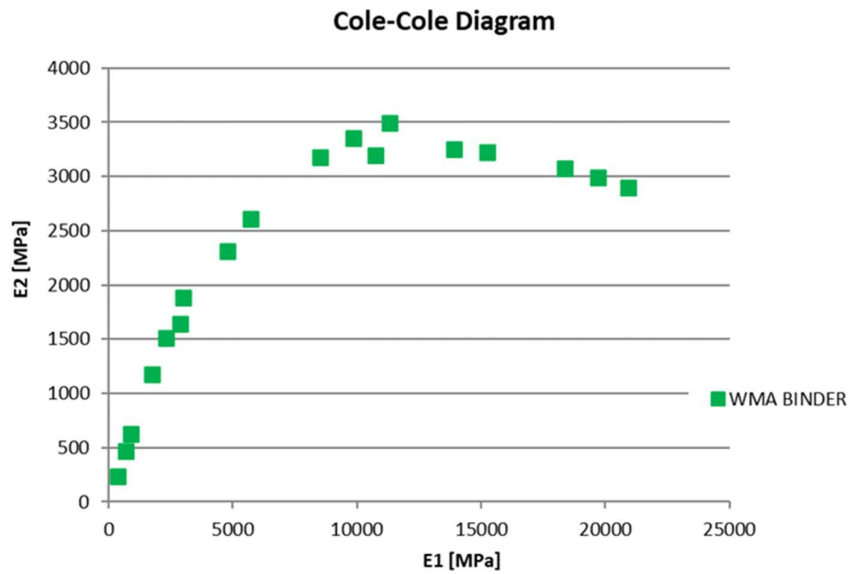


Figura 78 - Diagramma di Cole-Cole WMA Binder

Nel WMA binder è possibile evidenziare un comportamento termo-reologicamente semplice, per via della continuità dei dati sperimentali. Anche in questo caso il diagramma di Cole-Cole, tra i punti a 4 e 20 °C, presenta un salto.

4.2.4 Confronto HMA – WMA Binder

In questo paragrafo è possibile confrontare il comportamento dei HMA binder con quello del WMA binder, mostrando le curve maestre del modulo di immagazzinamento E_1 [Figura 79] e i parametri del modello 2S2P1D [Tabella 12].

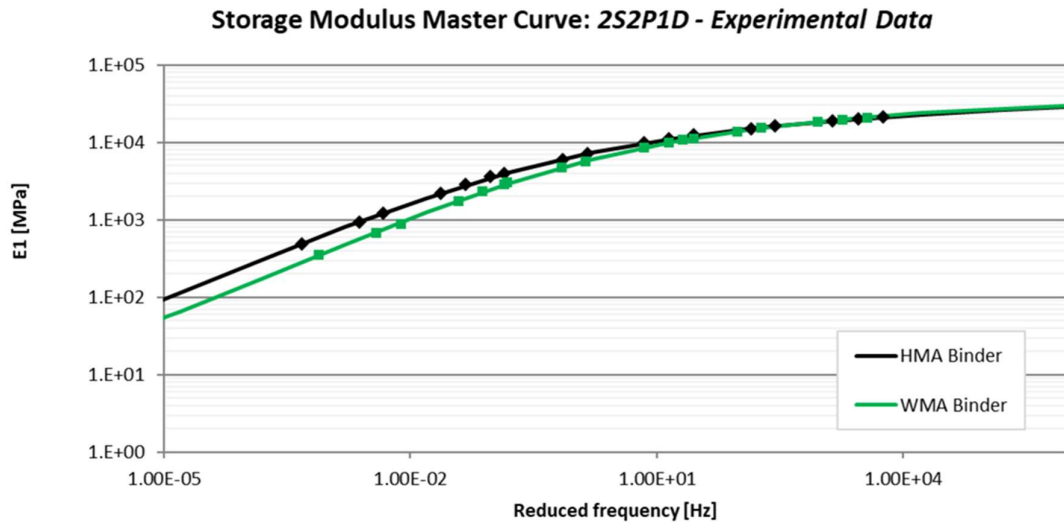


Figura 79- Confronto Curva maestra modulo di immagazzinamento E_1 tra HMA- WMA Binder

HMA-BINDER			Media	WMA-BINDER			Media
Moduli	H4.2	4.5	4.7	Moduli	W1.3	4.2	4.3
	H5.1	4.7			W3.2	4.1	
	H6.3	4.8			W3.3	4.5	

Figura 80- Confronto contenuto di vuoti HMA – WMA Binder

Miscela	δ	k	h	β	\log_T	$E_{1,0}$ [Mpa]	$E_{1,\infty}$ [Mpa]
HMA Binder	2.393	0.145	0.446	$1.00E+12$	-1.434	2.578	40000
WMA Binder	2.250	0.165	0.466	$1.00E+12$	-1.792	7.241	40000

Tabella 12- Parametri modello 2S2P1D

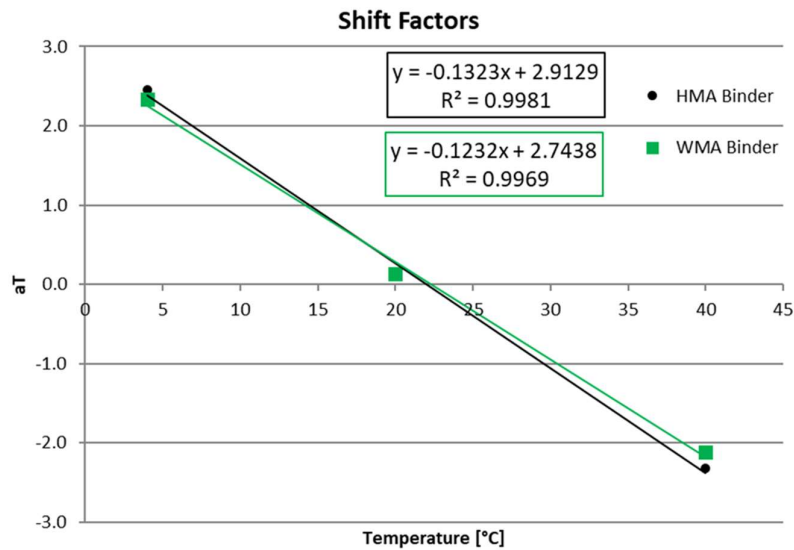


Figura 81 - Confronto Shift Factors HMA – WMA Binder

Confrontando i risultati ottenuti, è possibile osservare attraverso le curve maestre del modulo EI [Figura 79], come a parità di vuoti [Figura 80] lo strato di Binder della miscela di riferimento sia più rigido rispetto allo strato di Binder della miscela tiepida. Infatti, a titolo di esempio, la differenza alla frequenza di 20 Hz alla temperatura di 4 °C è mediamente di 1000 MPa, che si riduce a 300 MPa alle basse frequenze ed alte temperature di prova

Questo fenomeno è riconducibile all'invecchiamento del bitume presente nel RAP; infatti, nel caso di miscele a caldo il legante riscaldato a temperature più elevate (i.e. 160 – 170 °C) subisce ulteriori processi di ossidazione rendendo la miscela più rigida.

La termo-suscettibilità dell'HMA e WMA, indicata dalla pendenza della regressione lineare degli *Shift factors* [Figura 81], è simile (i.e. -0.1323 vs. -0.1232). Questo risultato conferma che la termosuscettibilità è una proprietà intrinseca della miscela (quindi non dipendente dai vuoti della miscela) dipendente dal bitume. E infatti il bitume è lo stesso nelle due miscele, ovvero un SBS modificato Hard.

4.2.5 HMA Base

Per l'interpretazione dei risultati dallo strato di base vanno fatte considerazioni aggiuntive; infatti, dal punto di vista del contenuto di vuoti si è registrata una disomogeneità tra le diverse carote. Tale aspetto è da imputarsi forse ad una non corretta compattazione dovuta ad una perdita di lavorabilità, causata da un calo di temperatura nella fase di compattazione ed a una percentuale minore di bitume come visto nel capitolo §3.1.2 (i.e. -0.5%). Quindi, per le prove di modulo, si sono scelti cinque provini (evidenziati) provenienti dalle carote 4 e 5, scartando la carota 6 poiché considerata non significativa.

MISCELA	CAROTA	%vuoti	% vuoti media
HMA BASE	4	6.3	6.6
		6.5	
		6.4	
		6.7	
		6.5	
		7.3	
	5	5.2	5.1
		5.5	
		4.2	
		4.8	
		5.4	
		5.4	
	6	9.0	8.2
		6.5	
		7.6	
		7.3	
		12.2	
		6.6	

Figura 82 - % Vuoti HMA base

Si presentano quindi le curve maestre del modulo complesso [Figura 84] e dell'angolo di fase [Figura 83] con i relativi Shift Factor [Figura 85] della miscela HMA base.

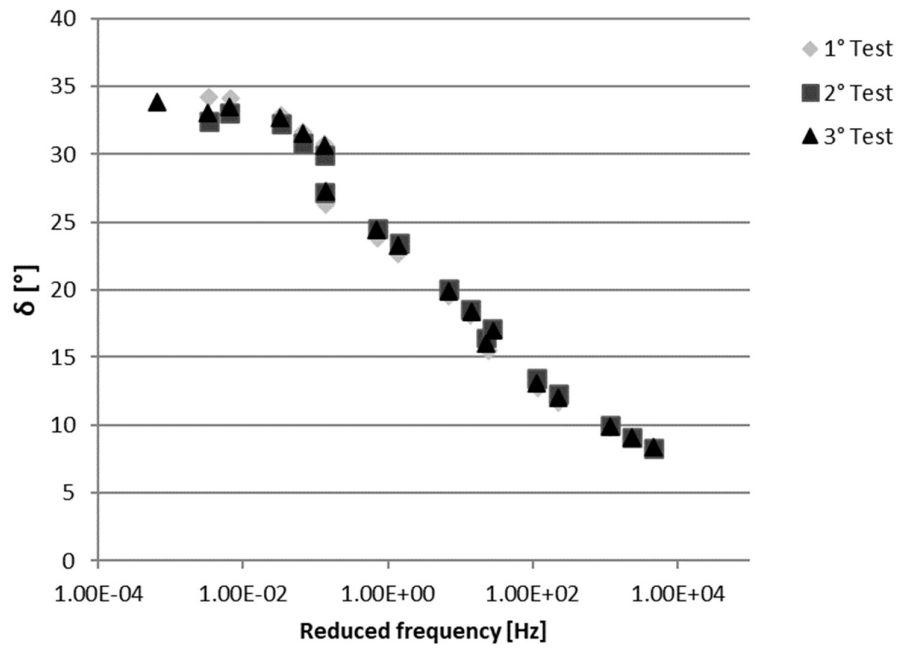


Figura 83 - Curva maestra dell'angolo di fase HMA Base

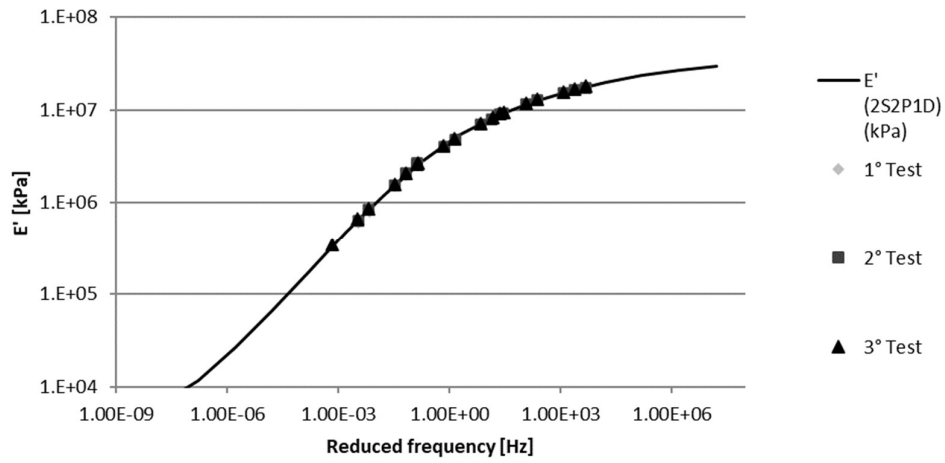


Figura 84- Curva maestra del modulo complesso E_1 HMA Base

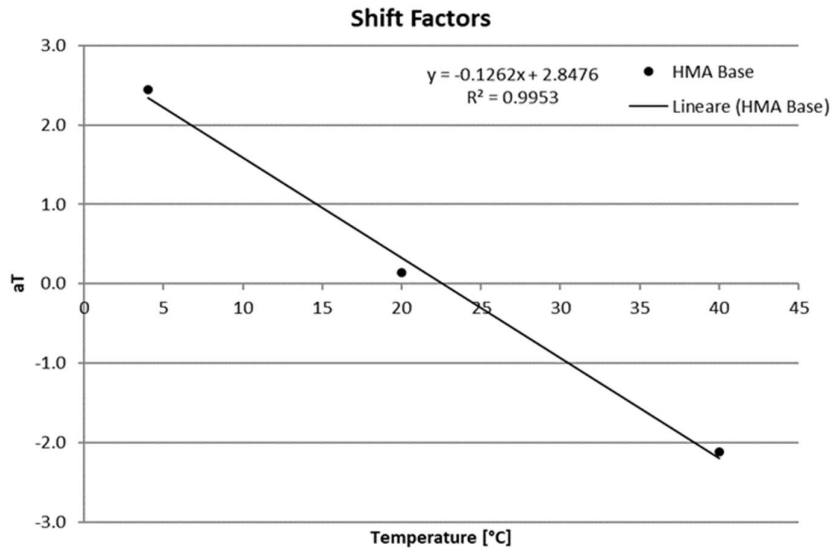


Figura 85- Shift Factors HMA Base

Come già descritto per le altre miscele la termo-dipendenza non è condizionata dai vuoti perché proprietà intrinseca del materiale.

Anche in questo caso è possibile notare la completa sovrapposizione tra il modello 2S2P1D e i dati sperimentali [Figura 84].

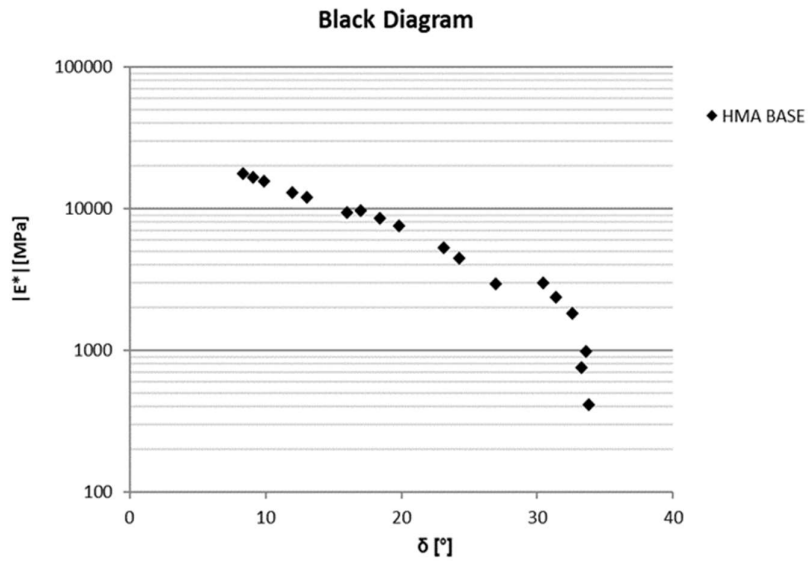


Figura 86- Diagramma di Black HMA Base

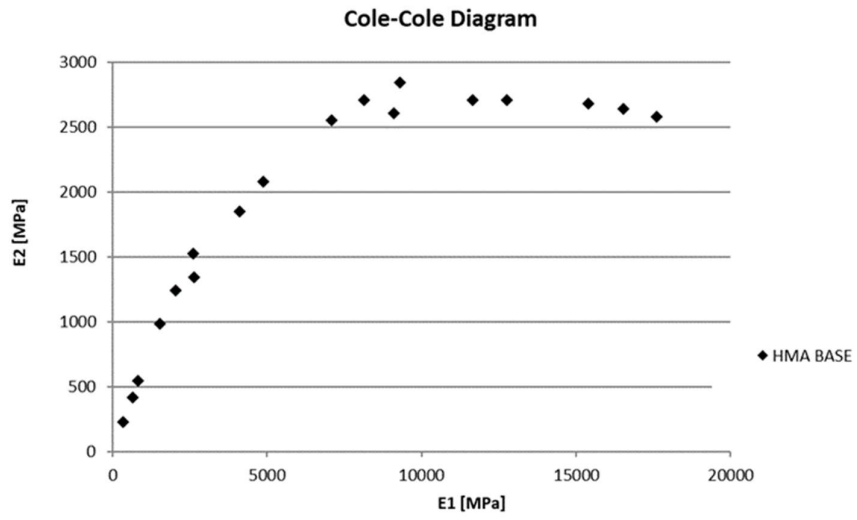


Figura 87- Diagramma Cole-Cole HMA Base

4.2.6 WMA Base

Anche per la base realizzata con tecnologia tiepida ci sono differenze in termini di contenuto di vuoti tra le diverse carote. Scartando la carota 1, si sono testati a modulo quattro provini provenienti da diverse carote al fine di confermare l'andamento della rigidità al variare delle condizioni di prova. Si presentano le curve maestre e i relativi *shift factor* per la loro costruzione.

MISCELA	CAROTA	% Vuoti	% Vuoti media
WMA BASE	1	8.7	7.0
		6.0	
		6.0	
		8.9	
		5.5	
		7.1	
	3	2.6	2.6
		1.9	
		2.0	
		4.0	
	2	3.0	3.7
		4.6	
		4.5	
		3.7	
		4.4	
2.2			

Figura 88 – contenuto di vuoti WMA base

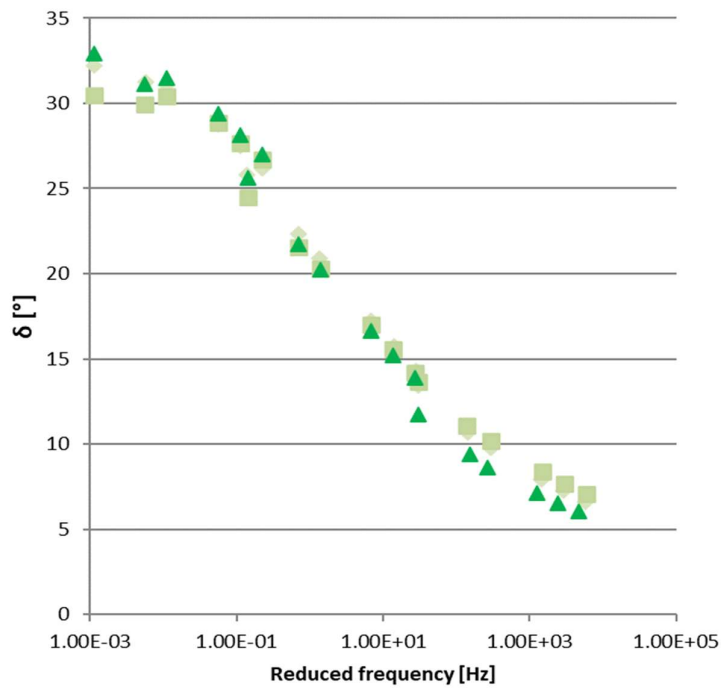


Figura 89 - Curva maestra angolo di fase WMA Base

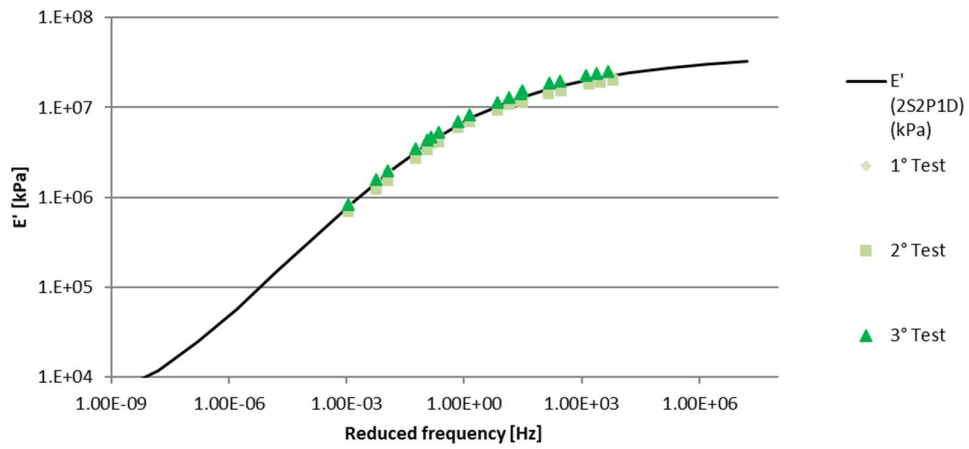


Figura 90- Curva maestra modulo complesso E1 WMA Base

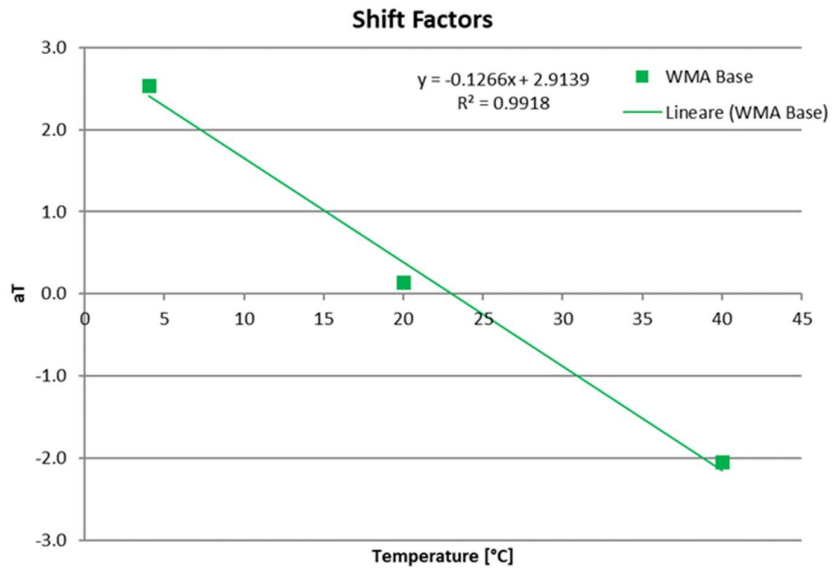


Figura 91 - Shift Factors WMA Base

Anche per questo strato è possibile notare la sovrapposizione dei dati sperimentali con il modello 2S2P1D.

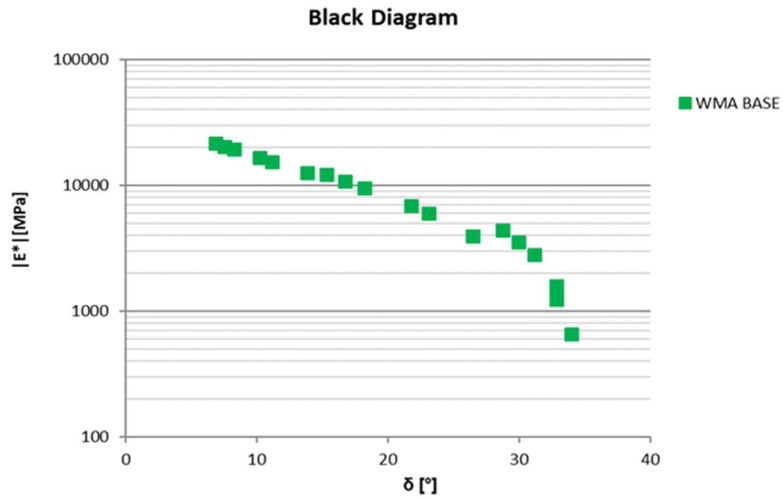


Figura 92- Diagramma di Black WMA Base

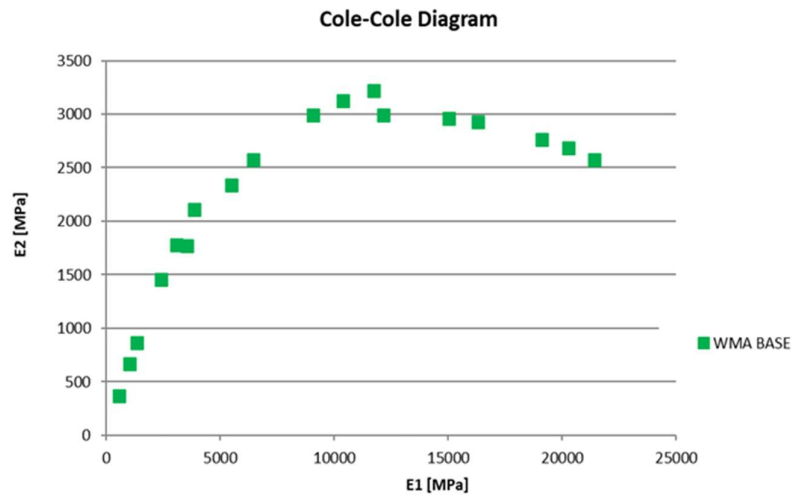


Figura 93 - Diagramma di Cole-Cole WMA Base

Si può notare anche la verifica del comportamento termo-reologicamente semplice, osservando sempre quel piccolo salto che si ha del diagramma di Cole-Cole tra i 20 e i 4 C°.

4.2.7 Confronto HMA-WMA Base

In questo paragrafo è possibile confrontare il comportamento dei HMA base con quello del WMA base, mostrando le curve maestre del modulo di immagazzinamento E1 [Figura 94] e i parametri del modello 2S2P1D [Tabella 13 Tabella 12].

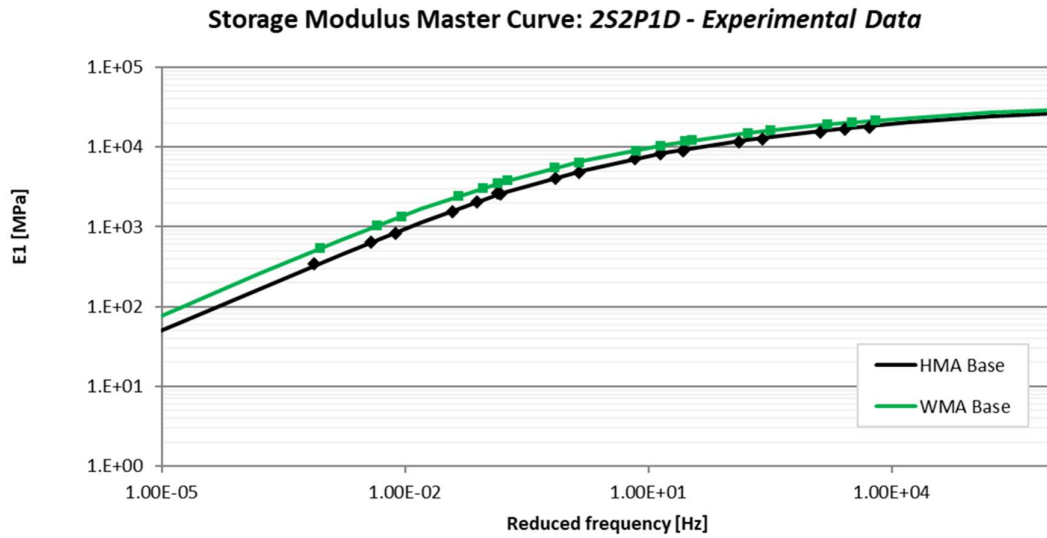


Figura 94- Confronto curva maestra del modulo complesso E1 HMA-WMA Base

HMA-BASE			Media	WMA-BASE			Media
Moduli	H4.4	6.3	6.0	Moduli	W2.5	4.6	4.4
	H4.5	6.5			W2.6	4.5	
	H4.8	6.5			W2.8	4.4	
	H5.5	5.5			W3.7	4.0	
	H5.8	5.4					

Figura 95- Confronto contenuto di vuoti HMA-WMA Base

Miscela	δ	k	h	β	\log_T	$E_{1,0}$ [Mpa]	$E_{1,\infty}$ [Mpa]
HMA Base	2.926	0.151	0.453	1.00E+12	-1.890	3.702	40000
WMA Base	2.101	0.147	0.426	1.00E+12	-1.474	4.271	40000

Tabella 13 - Parametri modello 2S2P1D

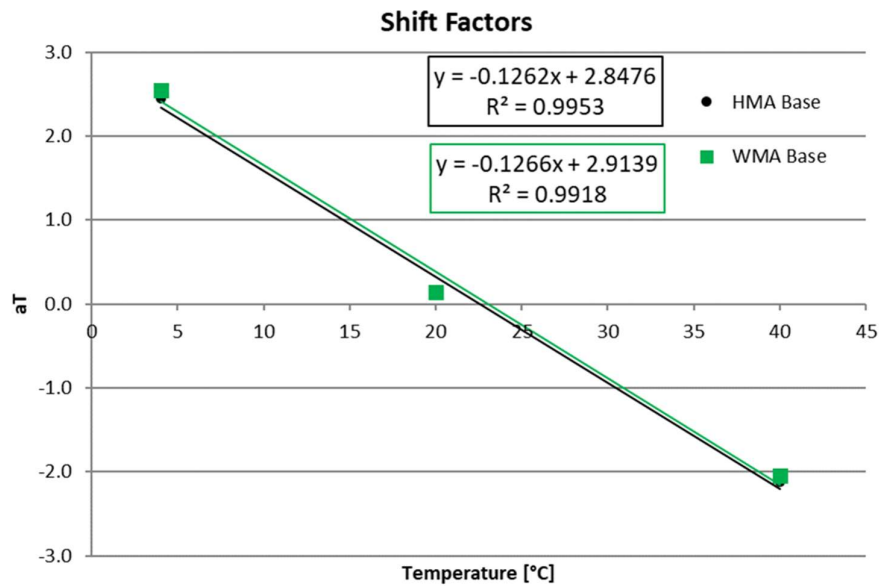


Figura 96- Confronto Shift Factors HMA-WMA Base

Al fine di confrontare i risultati ottenuti, va innanzitutto osservato che i provini testati HMA hanno un contenuto di vuoti maggiore del 2% rispetto al WMA [Figura 95].

È possibile notare dalle curve maestre del modulo E1 come la miscela WMA sia più rigida della miscela HMA. Infatti, a titolo di esempio, la differenza alla frequenza di 20 Hz alla temperatura di 4 °C è mediamente di 4000 MPa, che si riduce a 400 MPa alle basse frequenze ed alte temperature di prova. Questo comportamento è giustificato dal fatto che i provini di tiepido hanno un minor contenuto di vuoti.

La termo-suscettibilità dell'HMA e WMA, indicata dalla pendenza della regressione lineare degli *Shift factors* [Figura 96], è simile (i.e. -0.1262 vs. -0.1266). Questo risultato conferma che la termosuscettibilità è una proprietà intrinseca della miscela (quindi non dipendente dai vuoti della miscela) dipendente dal bitume. E infatti il bitume è lo stesso nelle due miscele, ovvero un SBS modificato Hard.

4.3 Prove di fatica

In questo paragrafo è possibile osservare il comportamento a fatica dei materiali studiati. Prima si commentano i risultati singolarmente, per poi fare un confronto tra HMA e WMA. I grafici di confronto sono la curva C-S e la retta per il parametro D^R , e l'indice sintetico Sapp.

4.3.1 HMA Binder

Nei successivi grafici verranno illustrati gli output delle prove di fatica a trazione diretta dello strato di binder realizzato con tecnologia a caldo.

Nel primo grafico illustrato [Figura 97] sono riportate le tre prove ricavate da tre provini. È possibile notare una differente lunghezza tra una prova ed un'altra, dovuto alla diversa durata della prova, stabilito a priori inserendo il valore più consono di *peak to peak micro-strain*. L'obiettivo finale è quello di avere una prova lunga una intermedia ed una corta così da ottenere un'ottima corrispondenza nella retta per la determinazione del D^R . Nel grafico successivo è possibile osservare il modello della curva C-S [Figura 97] che è stato realizzato tramite il programma FlexMAT™ Cracking fittando le curve sperimentali. Nella Figura 98 si riportano i tre punti sperimentali nel grafico Cum (1-C) vs. cicli a rottura, poi interpolati in una retta lineare passante per l'origine la cui pendenza è il parametro D^R .

I parametri delle singole prove sono riportati nella [Tabella 14]. Per la correttezza e validità della singola prova, si devono controllare:

- DMR compreso tra 0.85 e 1.15;
- Durata della prova compreso tra 2000 e 80000 cicli;
- Contenuto dei vuoti dei provini testati confrontabili ($\pm 0.5\%$)

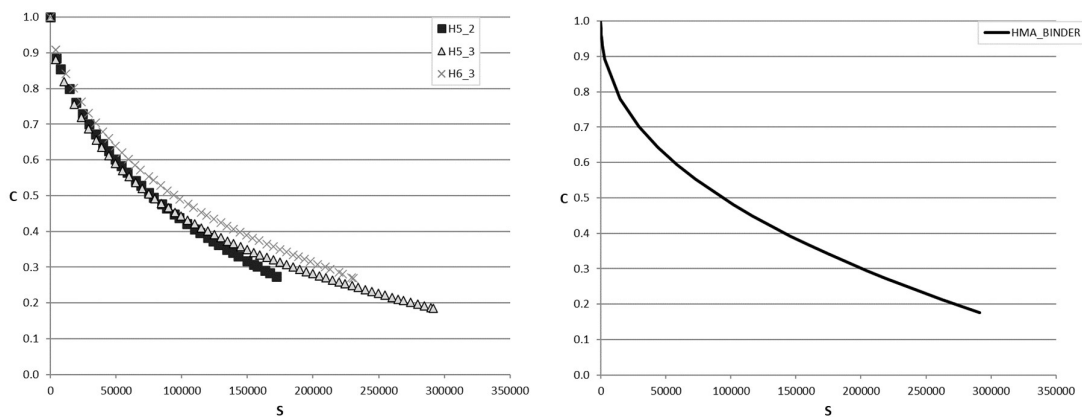


Figura 97 - HMA Binder: Curve C-S sperimentali (a sinistra) e modello (a destra).

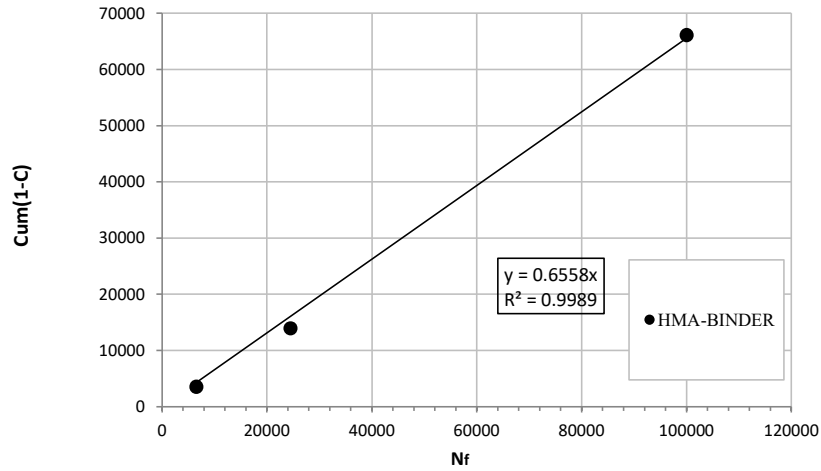


Figura 98 – Curva Cum(1-C) vs. Nf dell’HMA Binder

Specimen No & ID	Fingerprint [E*] [MPa]	HMA-BINDER							
		DMR 0.85<DMR<1.15	N _f	log (N _f)	Cum. (1-C)	DR _s	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	Sapp
H5_2	10343	0.95	6540	3.82	3562	0.545	260	4.3	12.94
H5_3	9932	0.91	100010	5.00	66151	0.661	230	4.9	22.25
H6_3	12179	1.12	24490	4.39	13970	0.570	240	4.8	17.95

Tabella 14 - Elaborazione dati S-VECD HMA binder

La durata della prova del provino H5_3 è molto lunga, infatti, la rottura è avvenuta a 100000 cicli, ma si hanno a disposizione poche prove con una rottura in mezzeria; quindi, si è deciso di accettare questo risultato.

4.3.2 WMA Binder

Anche nel caso della miscela tiepida i dati sperimentali sono riportati nei seguenti grafici:

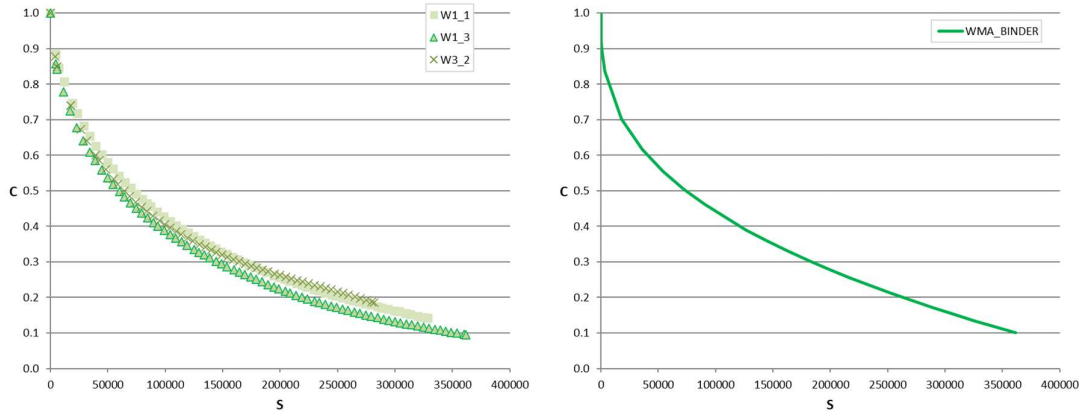


Figura 99 - WMA Binder: Curve C-S sperimentali (a sinistra) e modello (a destra).

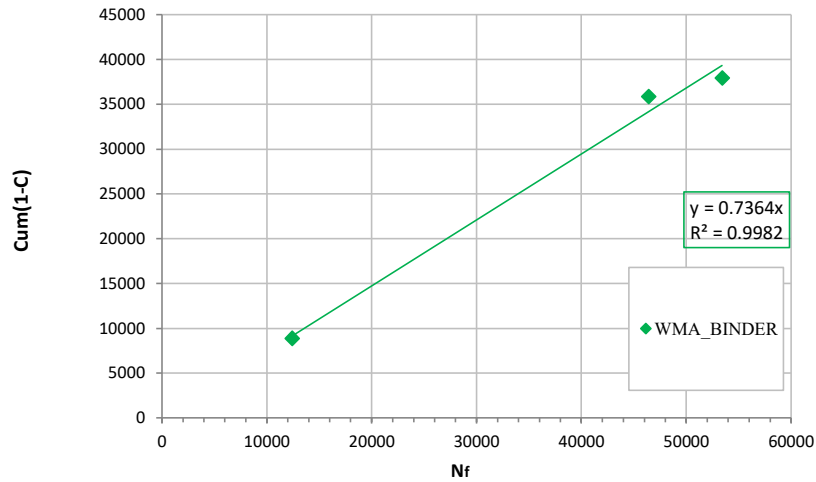


Figura 100 - Curva Cum(1-C) vs. N_f dell'WMA Binder

WMA_BINDER									
Specimen No & ID	Fingerprint [E*] [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N_f	$\log(N_f)$	Cum. (1-C)	DR_a	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	Sapp
W1_1	11127	1.13	12430	4.09	8887	0.715	300	3.6	28.32
W1_3	9322	0.95	46420	4.67	35882	0.773	270	4.2	31.32
W3_2	8864	0.91	53430	4.73	37936	0.710	300	4.1	26.58

Tabella 15- Elaborazione dati S-VECD WMA binder

Nello strato di binder realizzato con tecnologia tiepida le prove sono state tendenzialmente più lunghe come è possibile notare dal grafico [Figura 99], denotando un comportamento

tenace. Infatti, le curve C-S raggiungono valori di pseudo rigidezza C molto bassi, livelli ai quali il materiale è ancora in grado di offrire una resistenza malgrado l'avanzato livello fessurativo (alti valori di S).

4.3.3 Confronto HMA-WMA Binder

Nel seguente paragrafo si vanno a confrontare i provini testati a fatica dello strato di binder realizzati con miscela a caldo e provini realizzati con tecnologia tiepida. Nel confronto si analizzano non solo le curve C-S ma anche gli altri parametri caratteristici della teoria S-VECD.

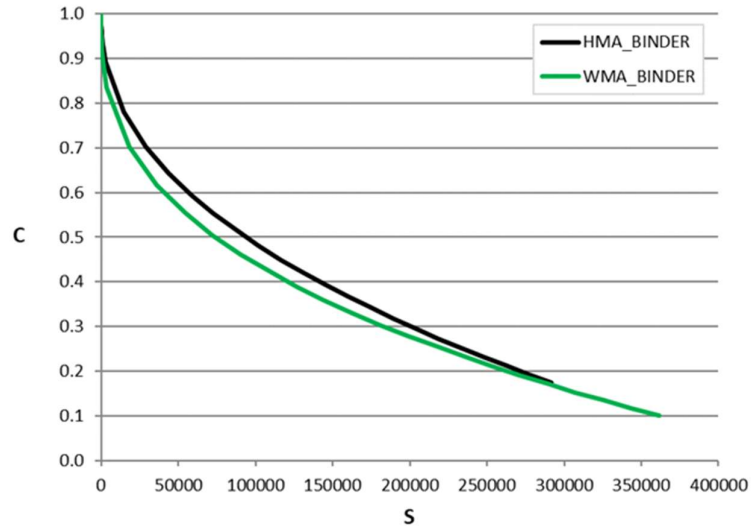


Figura 101- Confronto: curve C-S da modello HMA-WMA Binder

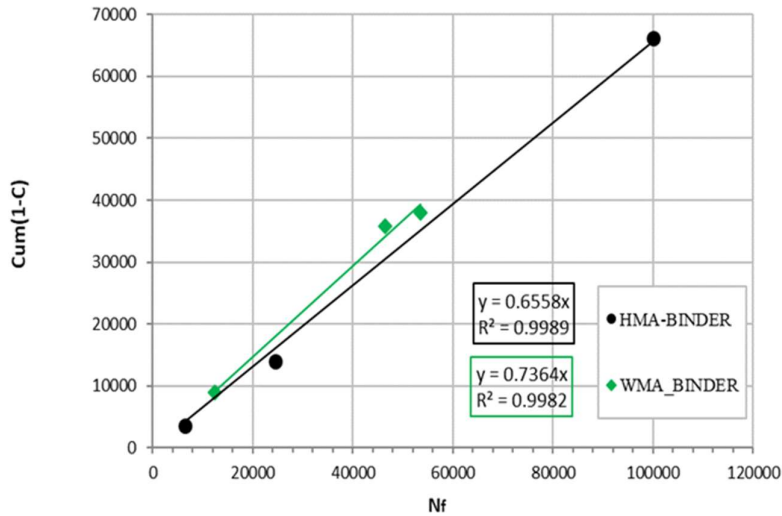


Figura 102- grafico cum (1-C) in funzione del numero di cicli

Specimen No & ID	Fingerprint [E*] [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N _r	log (N')	Cum. (1-C)	DR _s	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	Sapp
H5_2	10343	0.95	6540	3.82	3562	0.545	260	4.3	12.94
H5_3	9932	0.91	100010	5.00	66151	0.661	230	4.9	22.25
H6_3	12179	1.12	24490	4.39	13970	0.570	240	4.8	17.95

Tabella 16 - Elaborazione dati S-VECD HMA binder

Specimen No & ID	Fingerprint [E*] [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N _r	log (N')	Cum. (1-C)	DR _s	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	Sapp
W1_1	11127	1.13	12430	4.09	8887	0.715	300	3.6	28.32
W1_3	9322	0.95	46420	4.67	35882	0.773	270	4.2	31.32
W3_2	8864	0.91	53430	4.73	37936	0.710	300	4.1	26.58

Tabella 17 - Elaborazione dati S-VECD WMA binder

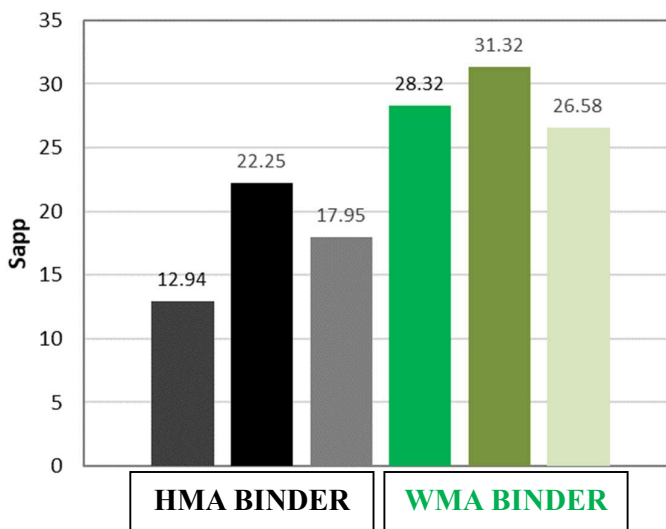


Figura 103- S_{app}

Confrontando i risultati ottenuti, è possibile osservare come a parità di vuoti [Tabella 16, Tabella 17] (i.e. in media 4.7 % e 4 %) la curva C-S del WMA sia più lunga di quella dell' HMA [Figura 101]: raggiunge valori più bassi della pseudo-rigidezza C e valori più elevati dell'indicatore di danno S. Questo significa una maggior tolleranza del danno, quindi una rottura posticipata della miscela tiepida.

Nel grafico di Figura 102 si osservano i valori del parametro DR^R, ovvero le pendenze delle rette interpolatrici dei punti sperimentali: sono pari a 0.6558 e 0.7364 rispettivamente per il caldo e il tiepido. Essendo tale parametro un indicatore della tenacità di un materiale; la miscela tiepida è caratterizzata da una maggiore tenacità rispetto alla tradizionale, avendo un valore più elevato.

Per quanto riguarda la miscela tiepida si hanno dei Sapp più elevati derivanti da rigidezza minore, maggior tenacità (DR^R più alto) e una maggior tolleranza al danno testimoniata dalla curva C-S. Da questo è possibile dedurre che sia un materiale con un comportamento a fatica migliore.

Infine, commentando l'indice sintetico Sapp, che tiene conto delle curve C-S, del D^R e della rigidità delle miscele: è possibile notare come la miscela di riferimento confezionata a temperature più elevate risulti caratterizzata da valori poco omogenei tra le ripetizioni. Questo fenomeno non è casuale, ma è dovuto all'effetto dell'elevata temperatura di confezionamento che ha ripercussioni sull'invecchiamento del fresato (pari al 30% in peso sugli aggregati) il quale, non essendo disperso omogeneamente all'interno della miscela, causa variabilità tra le diverse carote.

Quindi, l'impiego di miscele WMA porta ad avere condizioni di maggiore uniformità della pavimentazione con risvolti positivi sulla vita utile, questo dovuto all'assenza di zone critiche con prestazioni nettamente inferiori.

4.3.4 HMA Base

Nei successivi grafici verranno illustrati i risultati del comportamento a fatica dello strato di base realizzato con tecnologia a caldo.

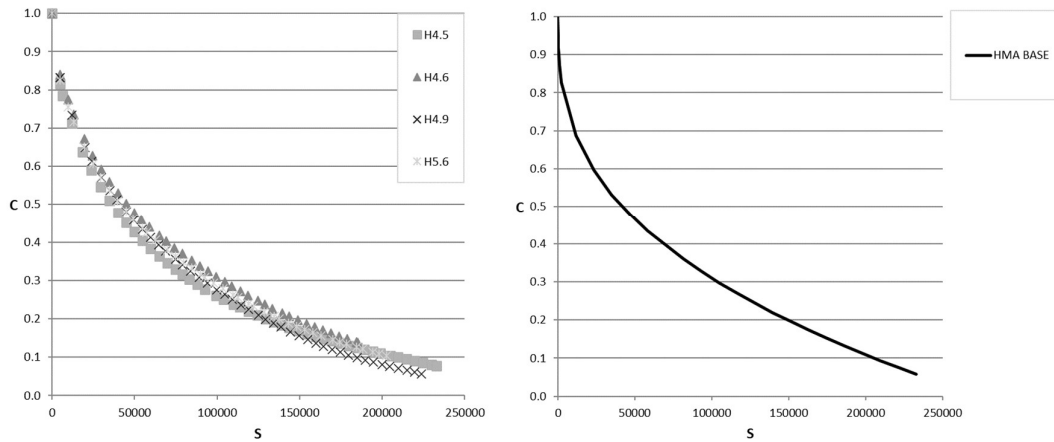


Figura 104- HMA Base: Curve C-S sperimentali (a sinistra) e modello (a destra).

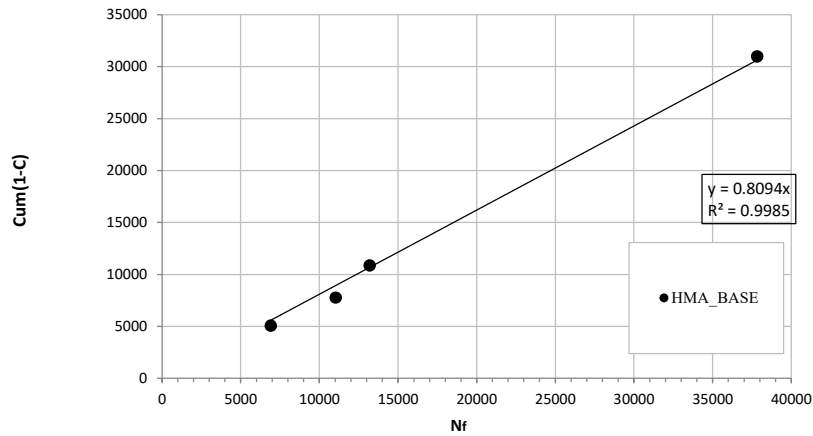


Figura 105 -grafico cum (1-C) in funzione del numero di cicli

Specimen No & ID	Fingerprint E* [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N _f	log (N _f)	Cum. (1-C)	DR _s	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	Sapp
1 : H4.5	8624	1.05	13190	4.12	10860	0.823	280	6.5	25.82
2 : H4.6	8754	1.07	11030	4.04	7763	0.704	280	6.4	18.93
3 : H4.9	7821	0.95	37830	4.58	30989	0.819	280	7.3	24.85
4 : H5.6	9595	1.16	6900	3.84	5074	0.735	270	4.2	19.97

Tabella 18 - Elaborazione dati S-VECD HMA base

Nel primo grafico illustrato [Figura 104] sono riportate le curve delle quattro prove riuscite, ovvero prove in cui si è verificata una rottura nell'area di misura e le cui curve C-S erano sovrapposte, idonee a essere utilizzate nel foglio di calcolo FlexMAT™. In questo caso sono state ottenute 1 prova-lunga e 3 prove medio-corte, che hanno permesso di ottenere una buona affidabilità del parametro di rottura D^R , pendenza della retta Cum (1-C) vs. numero di cicli.

4.3.5 WMA Base

Anche nel caso della miscela tiepida di base i dati sperimentali sono riportati nei seguenti grafici:

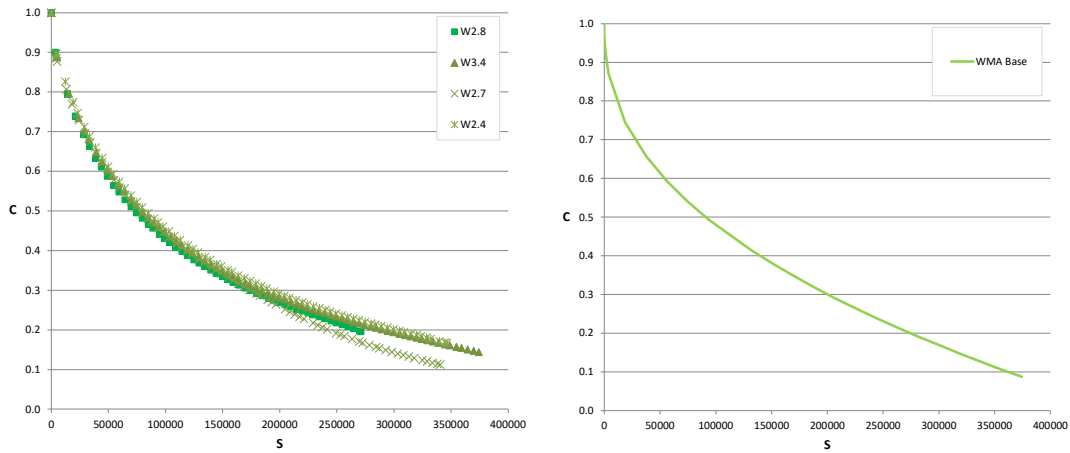


Figura 106- WMA Base: Curve C-S sperimentali (a sinistra) e modello (a destra).

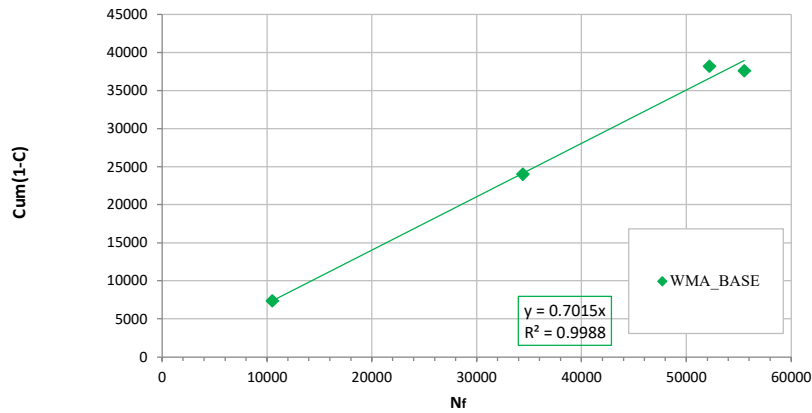


Figura 107 - grafico cum (1-C) in funzione del numero di cicli

Specimen No & ID	Fingerprint [E*] [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N _f	log (N _f)	Cum. (1-C)	DR ₀	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	Sapp
1 : W2.8	11594	1.13	55520	4.74	37595	0.677	240	4.4	23.98
2 : W3.4	12404	1.22	52220	4.72	38168	0.731	250	2.6	32.38
3 : W2.7	12028	1.18	10500	4.02	7381	0.703	270	3.7	26.86
4 : W2.4	12603	1.24	34410	4.54	23981	0.697	260	3.0	29.41

Tabella 19 - Elaborazione dati S-VECD WMA base

Nello strato di base come in quello di binder realizzato con tecnologia tiepida le prove sono state tendenzialmente più lunghe come è possibile notare dal grafico [Figura 106]. Con il foglio di calcolo FlexMAT™ Cracking si è andata a realizzare la curva del modello

[Figura 106]. Anche per lo strato di base WMA sono stati elaborati più provini rispetto al WMA binder. Come è possibile vedere dalla tabella [Tabella 19] il DMR è leggermente fuori range, ma sono accettabili per via del fatto che sono provini da sito e non da laboratorio, quindi è accettabile una maggiore variabilità. Le quattro prove sono risultate di lunghezze differenti, quindi ottime per una buona interpolazione dei punti corrispondenti a Cum(1-C) vs. numero di cicli a rottura.

4.3.6 Confronto HMA-WMA Base

Nel paragrafo si andranno a confrontare i provini testati a fatica dello strato di base realizzati con miscela a caldo e provini realizzati con tecnologia tiepida. Nel confronto si andranno ad analizzare non solo le curve C-S a confronto ma anche gli altri parametri caratteristici della teoria S-VECD.

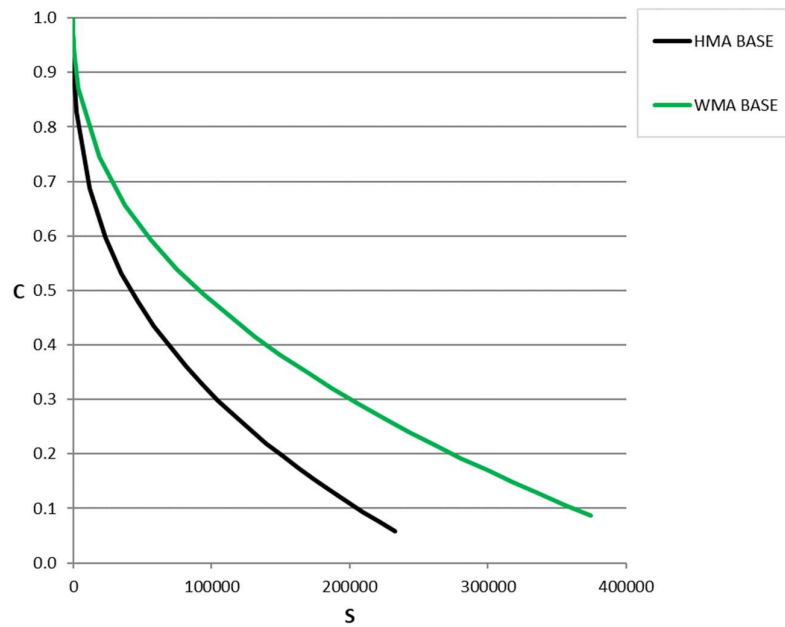


Figura 108 - Confronto: curve C-S da modello HMA-WMA Base

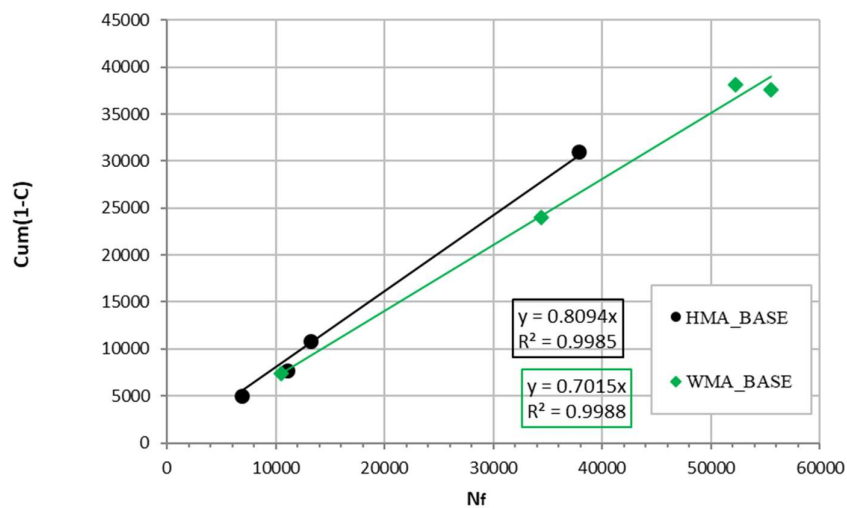


Figura 109 - grafico cum (1-C) in funzione del numero di cicli

Specimen No & ID	Fingerprint E* [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N _f	log (N _f)	Cum. (1-C)	DR _a	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	S _{app}
1 : H4.5	8624	1.05	13190	4.12	10860	0.823	280	6.5	25.82
2 : H4.6	8754	1.07	11030	4.04	7763	0.704	280	6.4	18.93
3 : H4.9	7821	0.95	37830	4.58	30989	0.819	280	7.3	24.85
4 : H5.6	9595	1.16	6900	3.84	5074	0.735	270	4.2	19.97

Tabella 20-Elaborazione dati S-VECD HMA base

Specimen No & ID	Fingerprint E* [MPa]	DMR 0.85<DMR<1.15	N _f	log (N _f)	Cum. (1-C)	DR _a	Input Strain (μ)	Vuoty SSD [%]	S _{app}
1 : W2.8	11594	1.13	55520	4.74	37595	0.677	240	4.4	23.98
2 : W3.4	12404	1.22	52220	4.72	38168	0.731	250	2.6	32.38
3 : W2.7	12028	1.18	10500	4.02	7381	0.703	270	3.7	26.86
4 : W2.4	12603	1.24	34410	4.54	23981	0.697	260	3.0	29.41

Tabella 21 - Elaborazione dati S-VECD WMA base

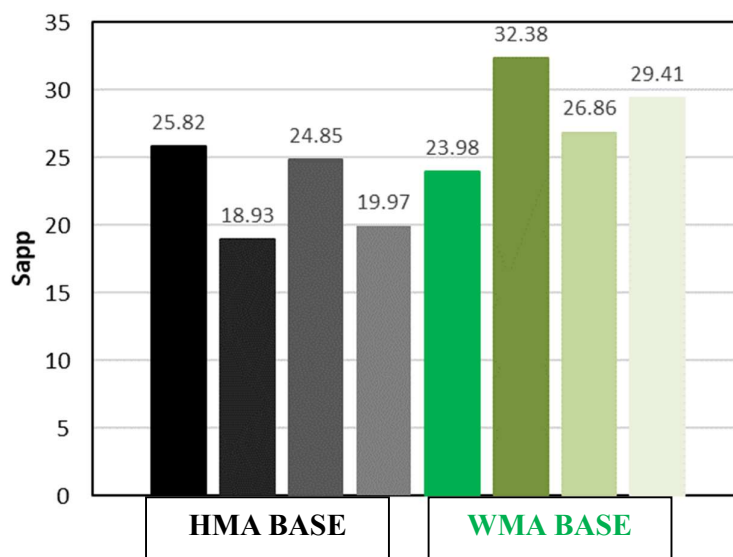


Figura 110- S_{app}

Confrontando i risultati ottenuti, il contenuto di vuoti dei provini HMA è maggiore di un 3% rispetto ai provini WMA [Tabella 20, Tabella 21] (i.e. 6.1% e 3.4 %).

La curva C-S del HMA è più bassa [Figura 108] per via del maggior contenuto di vuoti, quindi una rigidità minore, come già registrato dalle curve maestre. Infatti, raggiunge valori minori di pseudo-rigidità C a parità del danno S.

Nel grafico [Figura 109] il parametro D^R: ovvero, la pendenza della curva (i.e. 0.8094 e 0.7015) permette di stabilire la tenacità di un materiale; la miscela a caldo ha un D^R più elevato, ciò significa una maggior tenacità, rispetto alla miscela tiepida. Tale comportamento è attribuibile ad una minor rigidità per via del maggior contenuto di vuoti.

Infine, commentando l'indice sintetico S_{app}, che tiene conto delle curve C-S, del D^R e della rigidità delle miscele: è possibile notare come la miscela di riferimento

confezionata a temperature più elevate risulta caratterizzata da valori più bassi dell'indice S_{app} (i.e. 22) rispetto a valori di S_{app} più alti della miscela tiepida (i.e. 28). Nonostante la curva C-S e il parametro D^R della miscela a caldo indichino un comportamento a fatica migliore rispetto al tiepido, tale performance non sembrerebbe essere confermata dal valore del S_{app} . A tal proposito va ricordato che l'indice sintetico S_{app} esprime il comportamento in sito della miscela all'interno del pacchetto strutturale, non solo della miscela in sé. Poiché una maggior rigidità implica una miglior distribuzione dei carichi, lo strato di conglomerato tiepido avrebbe una maggior resistenza alla fatica ciclica rispetto alla miscela HMA

4.4 Valori dell'indice sintetico S_{app}

In questo capitolo vengono riepilogati i valori dell'indice sintetico S_{app} per ogni miscela, per poi successivamente fare un confronto con i limiti di classificazione proposti in letteratura basati sul numero di passaggi ESAL (Equivalent Single Axle Load) sopportabili. Tale indice permette un confronto tra miscele, dando inoltre la possibilità di avere un riscontro sulla prospettiva della vita in esercizio della pavimentazione.

Nella Figura 111 vengono riportati a confronto tutti i S_{app} medi di ogni strato.

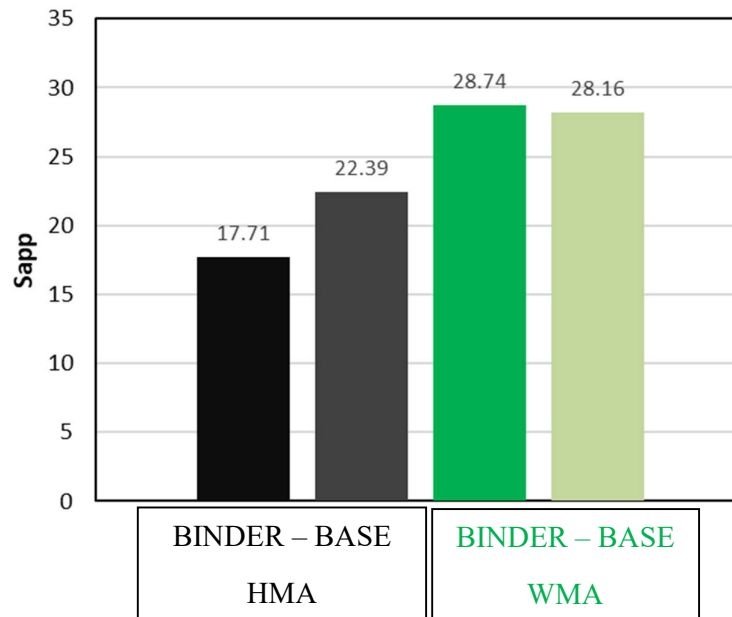


Figura 111 - Confronto S_{app} dei vari strati

Traffic (million ESALs)	S _{app} Limits	Tier	Designation
Less than 10	S _{app} > 8	Standard	S
Between 10 and 30	S _{app} > 24	Heavy	H
Greater than 30	S _{app} > 30	Very Heavy	V
Greater than 30 and slow traffic	S _{app} > 36	Extremely Heavy	E

Tabella 22 - Confronto ESAL – S_{app}

Nella Tabella 22 è possibile notare come una pavimentazione con indice S_{app} pari a minimo 8 sia in grado di sopportare sino a 10 milioni ESALs ed è designata come miscela di livello *standard*. Analogamente, una pavimentazione con S_{app} minimo di 24 è in grado di sopportare sino a 30 milioni di ESALs ed è designata come livello *Heavy*. A livello *Very Heavy* ed *Extremely heavy* corrispondono valori di S_{app} maggiori di 30.

È possibile notare dalla rappresentazione grafica [Figura 111] dei risultati tra binder e base della miscela a caldo che tendenzialmente l'indice sintetico è più alto nella base. Lo strato di base, che ha un contenuto di vuoti maggiore del 2% rispetto al binder ha un comportamento più tenace che incide sul parametro S_{app}. Entrambe ricadono nel livello *standard*.

I valori simili di S_{app} dell'WMA sono presumibilmente dovuti al simile contenuto di vuoti nello strato di binder e di base; i valori di rigidità sono infatti simili. Entrambi gli strati WMA ricadono nella categoria di livello *Heavy*, al limite del *Very heavy*.

Tale risultato permette di ipotizzare che strati di Warm Mix Asphalt siano idonei per la costruzione in ambito autostradale dove la richiesta di traffico pesante è importante. Potenzialmente offrono inoltre una prestazione migliore rispetto il conglomerato a caldo modificato usualmente impiegato, a cui si aggiungono i vantaggi a livello operativo e di sostenibilità ambientale.

Capitolo 5 – Conclusioni

Lo studio presentato nel presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di confrontare attraverso l'applicazione del metodo S-VECD il comportamento di una miscela realizzata con tecnologia tiepida rispetto ad una miscela realizzata con tecnica tradizionale a caldo.

Attraverso l'utilizzo del macchinario AMPT per l'esecuzione delle prove e del foglio di calcolo FlexMAT™ per l'elaborazione, è stato possibile caratterizzare le miscele ed ottenere dei risultati di ricerca importanti per la sperimentazione.

Inizialmente è stata caratterizzata la miscela con analisi granulometrica, determinazione della massa volumica del materiale, contenuto di legante e contenuto di vuoti mediante appositi strumenti.

Successivamente sono state effettuate prove di modulo dinamico per la determinazione delle curve maestre del modulo e dell'angolo di fase, analizzando il comportamento termo-reologico attraverso le curve di Black e Cole-Cole delle varie miscele.

Dai risultati delle prove di modulo dinamico si deduce che lo strato di binder HMA è più rigido dello strato di binder WMA, nonostante i vuoti siano confrontabili. Questo fenomeno è riconducibile all'invecchiamento del bitume presente nel RAP; infatti, nel caso di miscele a caldo il legante riscaldato a temperature più elevate (i.e. 160 – 170 °C) subisce ulteriori processi di ossidazione rendendo la miscela più rigida. Lo strato di base HMA è meno rigido dello strato di base WMA, a causa del contenuto di vuoti della miscela a caldo.

Infine, i provini sono stati testati con prove cicliche a trazione diretta per il comportamento a fatica. Successivamente, tramite il foglio di calcolo FlexMAT™ è stato possibile analizzare i risultati ricavando le curve del danno C-S, il parametro di rottura D^R e l'indice sintetico S_{app} .

Dai risultati delle prove cicliche a fatica si deduce che la miscela tiepida di binder ha dei S_{app} più elevati rispetto alla miscela a caldo indicando un comportamento a fatica migliore. Tale valore dell'indice deriva dalla minor rigidezza, dalla maggior tenacità (D^R più alto) e una maggior tolleranza al danno testimoniata dalla curva C-S.

La miscela di riferimento confezionata a temperature più elevate per lo strato di base risulta caratterizzata da valori più bassi dell'indice S_{app} (i.e. 22) rispetto a quelli della miscela tiepida (i.e. 28). Nonostante la curva C-S e il parametro D^R della miscela a caldo indichino un comportamento a fatica migliore rispetto al tiepido, tale performance non sembrerebbe essere confermata dal valore del S_{app} . Tale risultato è giustificato dal fatto che l'indice sintetico S_{app} esprime il comportamento in sito della miscela all'interno del pacchetto strutturale, non solo della miscela in sé: la maggior rigidezza dello strato tiepido permette una migliore distribuzione dei carichi.

È possibile commentare i risultati osservando che gli strati di base e binder realizzati con WMA hanno prestazioni superiori in termini di resistenza a fatica. Anche l'indice sintetico S_{app} è risultato idoneo a stabilire una gerarchia delle miscele, riassumendo sia la fase di

propagazione del danno sia lo stato di rottura del materiale. Si sono ottenuti alti valori per il tiepido (i.e. 29 e 28), ed intermedi per il caldo (i.e. 18 e 22).

In conclusione, considerati gli innumerevoli vantaggi della tecnologia WMA tra i quali la riduzione delle emissioni inquinanti, il miglioramento delle condizioni lavorative, il risparmio economico, la compattabilità in sito, l'ottima risposta a comportamento a fatica, si ritiene che tale tecnologia possa consentire una lunga vita utile alla pavimentazione, consentendo un elevato numero di passaggi veicolari prima di giungere a rottura. La ricerca di nuove tecnologie è sempre in evoluzione, e il Warm Mix Asphalt è un ottimo compromesso tra funzionalità meccaniche e salvaguardia dell'ambiente.

Bibliografia

1. Dahae Kim, Amirhossein Norouzi, Said Kass, Tara Liske, Y. Richard Kim, 2017. Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba. *Construction and Building Materials* 133: 39–50.
2. Flávio R. G. Padula, Sidney Nicodemos, Júlia C. Mendes et al. Evaluation of fatigue performance of high RAP-WMA mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technoogy*. 12, 430–434 (2019).
3. AASHTO TP 132:2019. Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).
4. AASHTO TP 133:2019. Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests.
5. UNI EN 12697-1:2020. Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 1: Contenuto di legante solubile.
6. UNI EN 933-1:2012 Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura.
7. UNI EN 1097-6:2013. Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati.
8. UNI EN 12697-6:2020. Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi.
9. François Olard, Herve Di Benedetto, 2003. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes, *Road Materials and Pavement Design*, 4:2, 185-224.
10. Youngsoo Richard Kim, 2008. *Modeling of Asphalt Concrete*. McGraw-Hill Education.
11. Benjamin Shane Underwood, Youngsoo Richard Kim, Murthy N. Guddati, 2010. Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model. *International Journal of Pavement Engineering*, 11 (6), 459-476.
12. Yizhuang David Wang, Youngsoo Richard Kim, 2019. Development of a pseudo strain energy-based fatigue failure criterion for asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 20 (10), 1182-1192.
13. Yizhuang David Wang, Benjamin Shane Underwood, Youngsoo Richard Kim, 2020. Development of a fatigue index parameter, S_{app} , for asphalt mixes using viscoelastic continuum damage theory. *International Journal of Pavement Engineering*.
14. Giuliani F., 2006. Definizione di una mappa nazionale di Performance Grade dei bitumi stradali. *Quarry and Construction*, 527, 1-12.