



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2021/2022

***La marcatura CE di miscele bituminose
innovative per pavimentazioni
autostradali ad elevate prestazioni***

Relatori:

Prof. Ezio Santagata
Prof. Pier Paolo Riviera
Ing. Riccardo Rabezzana

Candidato:

Luca Ruggio

Abstract

I materiali utilizzati per la costruzione delle infrastrutture viarie, siano essi i singoli costituenti o le miscele con essi realizzate, devono possedere precise caratteristiche per assicurare loro il raggiungimento dei requisiti finali ipotizzati in fase di progettazione. A tal fine, risulta essenziale la definizione di precise procedure atte a caratterizzare e verificare la produzione di tali prodotti.

A tal fine, dal 1° luglio 2013 è entrato in vigore il Regolamento prodotti da costruzione CPR 305/11 che fissa le condizioni per l'immissione, o la messa a disposizione sul mercato, dei prodotti da costruzione, definendo le disposizioni armonizzate per la descrizione della prestazione di tali prodotti in base alle loro caratteristiche essenziali e ai fini della marcatura CE. Le caratteristiche essenziali possono essere definite come quelle caratteristiche che si riferiscono ai requisiti di base di una pavimentazione. In particolare, nell'ambito di questo lavoro di tesi, sono state analizzate le caratteristiche compositive (in termini di distribuzione granulometrica e contenuto di legante) e volumetriche, e le prestazioni meccaniche (in termini di rigidità e accumulo di deformazioni permanenti).

Il recepimento di tale Regolamento è testimoniato dalla Dichiarazione di Prestazione (DoP), la quale costituisce l'atto formale con cui il Produttore dichiara, sotto la propria responsabilità, che il prodotto è conforme ad una specifica norma armonizzata. Al suo interno, il Produttore dichiara l'esecuzione di un processo di controllo in produzione unitamente alle caratteristiche del prodotto. In particolare, la DoP permette di descrivere la prestazione dei prodotti da costruzione in relazione alle caratteristiche essenziali di essi, nonché la continuità di prestazione di tali prodotti nelle fasi di prequalifica, di prove di produzione (campo prove) e di produzione (stesa vera e propria).

Il lavoro descritto in questo elaborato di tesi si colloca all'interno di questa tematica e si è focalizzato sulle procedure di caratterizzazione, necessarie ai fini della marcatura CE, di differenti miscele bituminose innovative. In dettaglio, sono state analizzate 4 miscele

per strato di base ad elevata resistenza a fatica, del tipo “rich-bottom base”, 5 miscele per strato di collegamento ad elevata resistenza all’ormaiamento, e 7 miscele per strato di usura, alcune delle quali contenenti un additivo in grado di contrastare la formazione del ghiaccio. Le miscele sono state prodotte in due impianti differenti ed hanno interessato l’intero ciclo di produzione e validazione di una miscela bituminosa (prequalifica, prova di produzione, produzione reale).

L’obiettivo finale è stato quello sviluppare e verificare la Dichiarazione di Prestazione per l’uso della marcatura CE di queste miscele, nonché valutare le caratteristiche essenziali in riferimento alla norma armonizzata UNI EN 13108.

Il lavoro di tesi ha previsto una intensa indagine sperimentale che ha permesso di valutare la costanza delle caratteristiche compositive, volumetriche e di lavorabilità, nonché la resistenza all’accumulo delle deformazioni permanenti e alla fessurazione per fatica, delle varie miscele indagate nelle differenti fasi di produzione.

I risultati ottenuti mostrano una sufficiente continuità a livello di caratteristiche essenziali all’interno dei singoli impianti per le diverse fasi di produzione, ma vi è una discreta discrepanza tra impianti differenti, ad eccezione degli strati di usura.

Sommario

Abstract	i
Introduzione	1
1 La Dichiarazione di Prestazione (DoP) e la marcatura CE	5
1.1 Regolamento prodotti da costruzione (CPR 305/11)	5
1.2 UNI EN 13108	9
2 Le miscele bituminose innovative ad elevate prestazioni.....	14
2.1 Le pavimentazioni perpetue.....	14
2.2 Fenomeni di degrado strutturale	19
2.2.1 Rottura per fatica.....	20
2.2.2 Ormaiamento	21
3 Caratterizzazione delle miscele	23
3.1 Massima massa volumica teorica (MMVT)	23
3.2 Contenuto di bitume.....	27
3.3 Analisi granulometrica delle miscele	30
3.4 Massima massa volumica teorica degli aggregati	34
3.5 Compattazione con pressa a taglio giratorio	34
3.6 Massa volumica (MV).....	41
3.7 Rigidezza nella configurazione di trazione indiretta.....	43
3.8 Modulo dinamico.....	48
3.8.1 Preparazione dei campioni.....	49
3.8.2 Esecuzione del test	54
3.8.3 Curve maestre	58
3.9 Flow number.....	61

4	Analisi dei dati.....	65
4.1	Analisi delle caratteristiche compositive e volumetriche.....	65
4.1.1	Contenuto di bitume.....	65
4.1.2	Analisi granulometrica.....	69
4.1.3	Analisi volumetrica con MMVT.....	77
4.1.4	Compattazione con pressa a taglio giratorio.....	81
4.2	Analisi delle caratteristiche meccaniche.....	90
4.2.1	Rigidezza nella configurazione IT-CY.....	92
4.2.2	Modulo dinamico e curve maestre.....	94
4.2.3	Flow number.....	98
5	Conclusioni.....	102
6	Bibliografia.....	107
7	Allegati.....	109
7.1	Allegato A: Compattazione con pressa a taglio giratorio.....	109
7.2	Allegato B: Rigidezza con IT-CY.....	115
7.3	Allegato C: Modulo dinamico e parametri delle curve maestre.....	117

Introduzione

Le miscele in conglomerato bituminoso per le infrastrutture stradali, così come tutti i materiali da costruzione, devono possedere specifiche caratteristiche definite in fase di progetto. L'obiettivo è mantenere le proprietà caratterizzanti costanti durante tutte le fasi della progettazione, elemento chiave per poter immettere un prodotto sul mercato. Le condizioni per l'immissione e la messa a disposizione delle miscele bituminose è normata dal Regolamento prodotti da costruzione CPR 305/11, che abroga la precedente Direttiva prodotti da costruzione CPR 89/106/CEE. Essa definisce le norme armonizzate necessarie per la descrizione delle prestazioni delle miscele bituminose sulla base delle loro caratteristiche essenziali, definite come i requisiti base di una pavimentazione, e per la loro caratterizzazione.

L'obiettivo finale è quello dell'apposizione della marcatura CE che, senza una testimonianza del recepimento della CPR 305/11, non è possibile apporre. Per fare ciò, è richiesta la Dichiarazione di Prestazione (DoP), un documento all'interno del quale il Produttore dichiara sotto la propria responsabilità che la miscela in conglomerato bituminoso è conforme alle specifiche norme armonizzate di riferimento. La DoP descrive le prestazioni della miscela progettata, conformemente alle sue caratteristiche essenziali, e ne attesta la costanza di prestazione durante tutte le fasi del processo di produzione, dalla prequalifica (all'interno della quale si effettua uno studio per la definizione del mix design), passando per la prova di produzione (per mezzo del campo prove), per poi arrivare alla fase di produzione vera e propria (stesa con vibrofinitrice).

Lo scopo prefissato all'interno di questo elaborato di tesi è la verifica della costanza di prestazione, ed eventualmente la possibilità di apposizione della marcatura CE, per le miscele in conglomerato bituminoso attinenti a diversi strati di una stessa pavimentazione flessibile. Si tratta nel particolare di un'autostrada che fa riferimento ad un Capitolato Speciale d'Appalto, il quale ne definisce le disposizioni per la riqualifica. Per questa ragione, le caratteristiche essenziali di riferimento riguardano proprio i limiti imposti da quell'elaborato.

L'obiettivo è la realizzazione di una pavimentazione perpetua, cioè una pavimentazione flessibile con un ciclo vita molto maggiore rispetto alle pavimentazioni classiche. Questo è possibile migliorando la resistenza a fatica e alle deformazioni permanenti, rispettivamente dello strato di base e collegamento, per mezzo dei limiti imposti dal Capitolato Speciale d'Appalto.

La riqualifica della pavimentazione è avvenuta attraverso l'intervento di due imprese, di cui ognuna ha un impianto di miscelazione per la realizzazione dei diversi mix in conglomerato bituminoso in esame. In questo contesto chiameremo i due impianti 1 e 2.

Le prove di laboratorio sono state condotte sulle miscele sfuse provenienti dagli impianti 1 e 2, in diverse fasi della progettazione. Per una maggiore chiarezza, di seguito si mostra una tabella riassuntiva (tabella 1).

Tabella 1 - Tabella riassuntiva delle miscele bituminose esaminate

1	Prequalifica	A _P	Usura 4 kg polimero
		B _P	Usura 5 kg polimero
		C _P	Collegamento 4,5 kg polimero
		D _P	Collegamento 5%filler
		E _P	Base 3 kg polimero
		F _P	Base 5% filler
	Prova di produzione	A _C	Usura
		C _C	Collegamento
		F _C	Base
2	Prequalifica	G	Usura
		H _P	Usura + winterpave®
		I _P	Collegamento
		J _P	Base
	Prova di produzione	H _C	Usura + winterpave®
		I _C	Collegamento
	Stesa	H _S	Usura + winterpave®

Da come si evince, è stata possibile realizzare l'analisi completa per la costanza della prestazioni solo per lo strato di usura proveniente dall'impianto 2 che, in particolare, ha anche realizzato due miscele differenti, una contenente un additivo antighiaccio e una che

non lo contiene, per poi procedere nelle altre fasi con la sola miscela con antighiaccio. Per i restanti mix, invece, l'analisi è stata resa possibile fino alla fase di prova di produzione. In particolare, l'impianto 1 ha realizzato diversi mix per lo strato di usura nella fase di prequalifica, variando il contenuto di polimero additivo, mentre per gli strati di collegamento e base ha variato il contenuto di filler.

Su tutte queste miscele sono state effettuate prove di caratterizzazione compositiva e volumetrica, facendo riferimento alle norme prescritte dal Capitolato Speciale d'Appalto e dal CPR 305/11. Nello specifico, sono state analizzate in questo ordine:

- Definizione della massima massa volumica teorica;
- Definizione del contenuto di bitume tramite ignizione;
- Analisi granulometrica;
- Compattazione con pressa a taglio girevole per valutare la lavorabilità della miscela e i vuoti;
- Definizione della massa volumica reale.

Terminata questa fase operativa, si è passati all'analisi vera e propria, condotta a diversi livelli. Prima di tutto, si sono confrontati i parametri ottenuti con i valori richiesti dal Capitolato, in modo da verificare la effettiva riuscita della miscela. Dopo di che il confronto è stato effettuato a livello del singolo strato, per ogni impianto, con lo scopo di verificare la costanza di prestazione nelle diverse fasi della progettazione all'interno dello stesso impianto. Infine, il confronto ha tenuto conto anche della costanza di prestazione tra i diversi impianti, facendo l'analisi al livello del singola fase di progettazione.

Terminato questo step, si è ritenuto opportuno eseguire un'analisi di caratterizzazione delle miscele da un punto di vista meccanico, compiuta solo su quelle ritenute idonee. In particolare, si è indagato l'effetto dell'additivo antighiaccio sulla miscela in termini di modulo elastico, in particolare valutando le variazioni che si hanno nella componente resiliente, per mezzo di una prova a trazione indiretta su campioni cilindrici. I dati ottenuti dalla caratterizzazione compositiva e volumetrica, in relazione alle richieste di Capitolato, hanno indotto lo studio delle caratteristiche meccaniche su altri due livelli. Per prima cosa, è stata condotta un'analisi in campo viscoelastico lineare per valutare il modulo dinamico

delle quattro miscele dello strato di usura dell'impianto 2, le due miscele di collegamento provenienti dall'impianto 2 e la miscela in prequalifica dello strato di collegamento per l'impianto 1. Da questa analisi sono state costruite e confrontate le curve maestre di riferimento. In secondo luogo, sugli stessi campioni, è stata analizzata la resistenza alle deformazioni permanenti per mezzo di una prova distruttiva di compressione monoassiale ciclica.

1 La Dichiarazione di Prestazione (DoP) e la marcatura CE

I materiali utilizzati per la costruzione delle infrastrutture viarie, siano essi i singoli costituenti o le miscele con essi realizzate, devono possedere precise caratteristiche per assicurare loro il raggiungimento dei requisiti finali ipotizzati in fase di progettazione. A tal fine, risulta essenziale la definizione di precise procedure atte a caratterizzare e verificare la produzione di tali prodotti.

Il Regolamento prodotti da costruzione CPR 305/11 fissa le condizioni per l'immissione, o la messa a disposizione sul mercato, dei prodotti da costruzione, definendo le disposizioni armonizzate per la descrizione della prestazione di tali prodotti in base alle loro caratteristiche essenziali e ai fini della marcatura CE. Per la definizione delle caratteristiche essenziali dei diversi prodotti, il Regolamento fa riferimento alla norma armonizzata UNI EN 13108.

1.1 Regolamento prodotti da costruzione (CPR 305/11)

Pubblicato sulla Gazzetta ufficiale il 4 aprile 2011, il Regolamento prodotti da costruzione abroga la Direttiva prodotti da costruzione (CPR 89/106 CEE) ed entra pienamente in vigore il 1° luglio 2013, recepito immediatamente da tutti gli Stati membri dell'Unione Europea.

Il CPR 305/11 fissa le condizioni per l'immissione sul mercato dei prodotti da costruzione, stabilendo le disposizioni armonizzate necessarie per la Dichiarazione di Prestazione e per l'apposizione della marcatura CE.

Nell'articolo 2 del Regolamento sono immediatamente fissate tutte le definizioni necessarie per una corretta interpretazione di esso. A tal proposito, in questo elaborato si ritiene opportuno elencare quelle di maggiore rilevanza e utilità:

- Caratteristiche essenziali: caratteristiche del prodotto da costruzione che si riferiscono ai requisiti base delle opere da costruzione;

- Prestazione di un prodotto da costruzione: la prestazione in relazione alle caratteristiche essenziali pertinenti, espressa in termini di livello, classe o mediante descrizione;
- Prodotto-tipo: l'insieme di livelli o classi di prestazione rappresentativi di un prodotto, in relazione alle sue caratteristiche essenziali, fabbricato utilizzando una data combinazione di materie prime o di altri elementi in uno specifico prodotto da costruzione;
- Controllo della produzione in fabbrica: il controllo interno permanente e documentato della produzione in una fabbrica, conformemente alle pertinenti specifiche tecniche armonizzate.

I materiali utilizzati in ambito stradale devono soddisfare i requisiti di base durante l'intero ciclo della loro vita. Tali requisiti sono alla base della preparazione dei mandati di normalizzazione e delle specifiche tecniche armonizzate per la definizione delle caratteristiche essenziali dei diversi prodotti. Essi sono riportati all'interno dell'Allegato I del Regolamento e vengono differenziati a seconda del tipo di prodotto. Nel caso specifico delle miscele bituminose prodotte a caldo, con riferimento alla norma armonizzata UNI EN 13108-1, i requisiti base da rispettare sono legati alla resistenza meccanica e stabilità, alla sicurezza in caso di incendio e alla sicurezza e accessibilità nell'uso.

In precedenza, il recepimento degli adempimenti previsti dalla Direttiva prodotti da costruzione per l'apposizione della marcatura CE era testimoniato dalla Dichiarazione di Conformità, che costituiva l'atto formale con cui il Produttore dichiarava, sotto la propria responsabilità, che il prodotto era conforme alla specifica Norma armonizzata. Con il CPR 305/11, la Dichiarazione di Conformità è sostituita dalla Dichiarazione di Prestazione (DoP) di cui il Produttore ne è il responsabile della obbligatoria redazione, necessaria per la regolare immissione del prodotto sul mercato. Con la DoP, il Produttore dichiara l'esecuzione del controllo in produzione unitamente alle caratteristiche del prodotto, descrivendone la prestazione in relazione alle proprie caratteristiche essenziali, conformemente a quanto definito nelle specifiche tecniche armonizzate.

La DoP viene emessa per la singola miscela in conglomerato bituminoso e deve generalmente accompagnare il prodotto, in modo che sia sempre a disposizione

La Dichiarazione di Prestazione deve essere redatta secondo il modello definito nell'Allegato III e, per una maggiore comprensione, in questo testo si fa riferimento alla figura 1. In dettaglio, essa deve contenere (in giallo le parti di testo da compilare):

- (A) Il numero della Dichiarazione, che deve comprendere i riferimenti della singola miscela e del codice di validazione (es. 123/02, dove 123 è il numero definito della miscela e 02 è il codice progressivo di validazione);
- (B) Il riferimento del prodotto-tipo per cui viene redatta la DoP;
- (C) Il codice miscela e l'indice di validazione;
- (D) L'uso previsto del prodotto e la norma armonizzata con anno di emissione annessa;
- (E) Il nome del fabbricante e l'indirizzo dello stabilimento di produzione;
- Il mandatario (se presente);
- Il sistema di valutazione della costanza della prestazione del prodotto da costruzione;
- (F) Il nome dell'Organismo Notificato e il numero di iscrizione;
- (G) Il numero del certificato;
- (H) L'elenco delle caratteristiche contenute nell'Allegato ZA della norma armonizzata anche se non determinate (NPD);
- (I) Il livello/classe determinato mediante definizione del prodotto-tipo. Per le caratteristiche non determinate si riporta la dicitura "NPD" (nessuna prestazione determinata);
- (J) Norma armonizzata completa di parte e data;
- (K) Luogo e data di rilascio;
- (L) Firma del dichiarante e funzione in azienda.

Un tema fondamentale ai fini della marcatura CE per un determinato prodotto è quello della valutazione e verifica della costanza della prestazione. Essa deve essere conforme ad un preciso sistema di attestazione che, all'interno del Regolamento prodotti da costruzione, fa riferimento all'Allegato V e in cui sono riportati, per ogni sistema di attestazione, i soggetti responsabili e le attività correlate.

Per le miscele bituminose prodotte a caldo è assegnato il sistema di valutazione 2+. Lato produttore, esso ha il compito di determinare il prodotto-tipo, nonché effettuare il controllo della produzione in fabbrica e le ulteriori prove sui campioni prelevati in impianto in conformità del piano di prova descritto. Le prove di laboratorio eseguite per la determinazione delle caratteristiche del prodotto tipo e per i controlli periodici in produzione non prevedono il ricorso di organismi notificati, motivo per cui il Produttore può avvalersi di strutture interne o esterne purché le prove siano eseguite in conformità ai metodi di prova europei. Lato organismo notificato, esso ha il compito di rilasciare il certificato di conformità del controllo della produzione in fabbrica (FCP) fondandosi sull'ispezione iniziale dello stabilimento di produzione e del controllo della produzione in impianto e sulla sorveglianza, valutazione e verifica continue del controllo di produzione.

1.2 UNI EN 13108

Le Norme Europee di cui si fa riferimento in questo testo e legate alla Dichiarazione di Prestazione, nonché all'apposizione della marcatura CE sono del gruppo UNI EN 13108, in particolare, delle Parti 1, 20 e 21.

La UNI EN 13108-1 è sicuramente la più importante perché ha lo scopo di consentire la specificazione delle miscele in conglomerato bituminoso su base prestazionale. Essa è stata elaborata in base al mandato conferito al CEN (comitato europeo di normalizzazione) dalla Commissione Europea e dalla Associazione Europea di Libero Scambio con lo scopo di supportare i requisiti essenziali del CPR 305/11. A questo fine, si fa riferimento all'Allegato ZA della stessa norma.

Il testo si può suddividere in due grandi gruppi. Nella prima parte vengono definiti, sotto ogni punto di vista, tutti i requisiti necessari per i materiali costituenti e le miscele bituminose: le caratteristiche compositive (in termini di curva granulometrica e contenuto di legante) e volumetriche, nonché le caratteristiche meccaniche (resistenza all'abrasione, rigidità, resistenza alle deformazioni permanenti e alla fatica), la definizione della temperatura della miscela e molte altre. Per la definizione di questi requisiti bisogna rispettare delle precise metodologie che vengono citate all'interno della UNI EN 13108-1

nei diversi capitoli. Si può generalizzare dicendo che in gran parte fanno riferimento alla UNI EN 12697 in tutte le sue parti. Esse stabiliscono, secondo regole ben precise e in maniera dettagliata, tutti i metodi di prova per la determinazione delle caratteristiche fondamentali. All'interno della prima parte del testo si fa riferimento anche alla valutazione e verifica della costanza della prestazione, necessaria per dimostrare l'ottemperanza della miscela in esame con i requisiti delle Norme Europee e con le performance dichiarate dal produttore per mezzo della DoP. Questo procedimento viene eseguito per mezzo della determinazione del prodotto-tipo, ai sensi della UNI EN 13108-20, e per mezzo del controllo della produzione in fabbrica eseguito dal produttore conformemente alla UNI EN 13108-21.

La seconda parte della Norma, invece, è quella dell'Allegato ZA. Da un punto di vista normativo, è la sezione più importante del testo in quanto viene citata nel Regolamento prodotti da costruzione (CPR 305/11) con lo scopo di rapportarla ad esso. Infatti, è necessaria per l'elaborazione della Dichiarazione di Prestazione e per l'apposizione della marcatura CE, in quanto ne stabilisce i criteri: per ogni caratteristica essenziale del prodotto si fa riferimento ad una clausola che si trova all'interno della prima parte della UNI EN 13108-1 e che fa riferimento a sua volta ad altre norme che regolano tale caratteristica. La figura 2 mostra un esempio di relazione tra UNI EN13108-1 e CPR 305/11, in questo caso legato alla caratteristica essenziale della rigidità di una miscela bituminosa.

Product: Asphalt Concrete			
Intended use: For use on roads, airfields and other trafficked areas.			
Essential Characteristics	Clauses in this and other European Standard(s) related to essential characteristics	Classes and/or threshold levels	Notes
Stiffness	5.2.2 Target Grading	-	Declared values
	5.2.3 Target binder content	-	Declared value
	5.3.2.1 Void content	-	Declared minimum or maximum category, class or numerical value
	5.3.6 Stiffness	-	Declared minimum or maximum category, class or numerical value
	5.4 Temperature of the mixture	-	Declared maximum and minimum value

Figura 2 - Clausole di UNI EN 13108-1 legate alla rigidità per la sua corretta definizione in relazione all'apposizione della marcatura CE

Per avere un quadro più completo nella procedura di valutazione e verifica della costanza della prestazione, è necessario introdurre anche la Norma Europea UNI EN 13108-20, progettata per essere utilizzata parallelamente alla UNI EN 13108-1. All'interno di essa si tratta il prodotto-tipo e la procedura per definirlo (test-tipo), con la funzione di garantire che una certa miscela sia conforme agli standard, anche se lo scopo non è apporre la marcatura CE. Nel caso particolare in cui essa venga inserita, allora sarà compito del produttore verificare che la miscela prodotta continui ad essere conforme a quanto dichiarato per il prodotto-tipo immesso per la prima volta sul mercato.

Si intende per prodotto-tipo un insieme di livelli o classi di prestazioni rappresentative di esso, messe in relazione con le sue caratteristiche essenziali. Esso viene ricavato a partire dalla procedura di test-tipo, realizzata secondo gli standard definiti dalle norme che ne richiedono anche un report con validità quinquennale a meno di significative modifiche apportate al prodotto-tipo.

Nel seguente elaborato di tesi, il test-tipo per la definizione delle proprietà del prodotto-tipo è stato realizzato per mezzo di una validazione di produzione, cioè realizzando campioni con miscele prodotte direttamente negli impianti di produzione (quindi non in laboratorio partendo dai materiali costituenti). Tutti i test e le loro procedure fanno

riferimento agli Allegati C e D di questa norma, in cui viene definito sia come performare i test per la realizzazione dei campioni, che i test per la valutazione delle proprietà del prodotto-tipo. Entrambi, come nel caso della UNI EN 13108-1, fanno riferimento per lo più alla UNI EN 12697, in tutte le sue parti.

L'ultima parte fondamentale nel processo di valutazione e verifica della costanza della prestazione per le miscele bituminose della UNI EN 13108 è la 21, riguardante il controllo della produzione in fabbrica (FPC). Questa norma è stata redatta per fornire la base per il controllo qualità e conformità delle miscele, nonché per definire i criteri minimi di FPC per l'apposizione della marcatura CE.

Per controllo della produzione in fabbrica si intende un controllo documentato, permanente ed interno della produzione in impianto, in conformità con le specifiche tecniche armonizzate per assicurare che il prodotto in commercio ottemperi ai livelli di performance dichiarati nella DoP. In questa norma il controllo viene effettuato sui materiali costituenti, la composizione e la miscelazione mediante campionamento e ispezioni. Infatti, non tiene conto del monitoraggio delle prestazioni che invece viene spiegato e va eseguito come descritto nella UNI EN 13108-20. Questo tipo di controllo è però obbligatorio nel momento in cui si vuole apporre la marcatura CE secondo il CPR 305/11. La parte 21 è applicabile per il controllo delle miscele bituminose di cui si conoscono i materiali costituenti e la composizione target che hanno mostrato di essere conformi ai requisiti compositivi e prestazionali del test-tipo (UNI EN 13108-20).

Le frequenze e le tolleranze per le prove sul prodotto concernenti la costanza della prestazione sono definite nell'Allegato A. In particolare, esistono tre livelli di frequenza: X, Y, Z dove, rispettivamente, diminuisce la frequenza del test (Z è il livello minimo da effettuare in ogni caso). Per determinare a quale livello fare riferimento per un certo impianto, per prima cosa si devono analizzare la granulometria e il contenuto di bitume di campioni random di miscele bituminose provenienti dall'impianto. Si definisce, poi, la tolleranza che si vuole considerare (esistono due tabelle all'interno delle quali si definiscono livelli di tolleranza differenti a seconda del metodo che si utilizza) e su quella, considerando delle ultime 32 analisi quelle non conformi, viene definito il Livello di

Conformità Operativa (OCL). Tramite quest'ultimo entrando nella sotto riportata tabella (figura3), si definisce la frequenza minima di analisi del prodotto finito.

Level	OCL A	OCL B	OCL C
X	600	300	150
Y	1000	500	250
Z	2000	1000	500

Additionally, for operational plants, there shall be at least one test per five operating days.
 Level Z shall be the minimum test frequency applicable for all purposes.
 Levels X and Y may be used in documents related to the application of the product.
 Different levels may be used for different product types: e.g. small aggregate/large aggregate. The figures in Table A.4 are those for single analyses, whether working to the single result or mean of four approaches. Thus when working to the mean of four, the tonnage figures shall be multiplied by four, for each mean value.

Figura 3 - Frequenza minima di analisi del prodotto finito (tonnes/test)

L'ultimo step riguarda i compiti per l'analisi del FPC nell'ambito della valutazione e verifica della costanza di prestazione, definiti nell'Allegato B. In primo luogo, si effettua un'ispezione iniziale, nella quale un corpo notificato verifica che i processi che influenzano direttamente la qualità e la conformità della miscela rispettino gli standard europei, oltre il fatto che effettuano una visita di controllo dell'impianto. In seguito, si effettua una sorveglianza continua, che generalmente avviene una volta l'anno.

2 Le miscele bituminose innovative ad elevate prestazioni

All'interno di questo capitolo si discuterà delle pavimentazioni perpetue, con un accenno alle differenze con le pavimentazioni flessibili classiche. Nello specifico, si tratterà del pacchetto legante e quindi dei tre strati più superficiali: usura, collegamento e base. Per concludere, si farà un breve richiamo ai fenomeni principali di degrado strutturale, essendo essi parte integrante del lavoro di tesi.

2.1 Le pavimentazioni perpetue

La pavimentazione perpetua, dall'inglese "perpetual pavement", è legata al concetto di pavimentazione a lunga durata strutturale. Infatti, se adeguatamente mantenuta può avere un ciclo vita molto maggiore delle pavimentazioni classiche, arrivando ai 50 anni di durata.

Ricadendo nel gruppo delle pavimentazioni flessibili, essa è definita come la sovrastruttura piana soggetta direttamente alle azioni del traffico veicolare, caratterizzata da una bassa rigidità flessionale (si deflette sotto carico). È composta da una successione di strati sovrapposti con diversa funzione e composizione che lavorano come fossero un unico pacchetto. Infatti, nel progetto di una pavimentazione flessibile è necessario soddisfare due requisiti fondamentali:

- Da un punto di vista strutturale, è necessario ridurre le tensioni trasmesse al sottofondo stradale di un livello compatibile alla capacità portante di esso, ripartendo le azioni dei veicoli in modo che non subisca delle deformazioni eccessive. Inoltre, la pavimentazione deve costituire una struttura stabile nel tempo e poco deformabile, in modo da sopportare i carichi ripetuti applicati e resistendo alle forme di degrado strutturale e meccanico;
- Da un punto di vista funzionale, è necessario garantire la sicurezza della circolazione in termini di aderenza pneumatico-pavimentazione (soprattutto in presenza di agenti atmosferici come acqua, fango, ghiaccio e neve), ma anche in

termini di comfort di marcia (limitando l'inquinamento acustico e le vibrazioni trasmesse ai veicoli).

Mentre in passato la progettazione delle pavimentazioni flessibili era del tutto empirica, basata sulla relazione tra osservazione delle prestazioni, livelli di traffico, spessore dello strato e indicatori che rappresentano la qualità del materiale, per la progettazione delle pavimentazioni perpetue si adoperava un nuovo approccio di tipo empirico-meccanicistico (mechanistic-empirical approach). Esso è basato su modelli analitici (che rappresentano la situazione reale) all'interno dei quali si valuta la risposta della pavimentazione in termini di sollecitazioni, deformazioni e spostamenti, nel contesto di vita utile di essa. Più il modello è specifico e dettagliato e meglio rappresenterà la realtà.

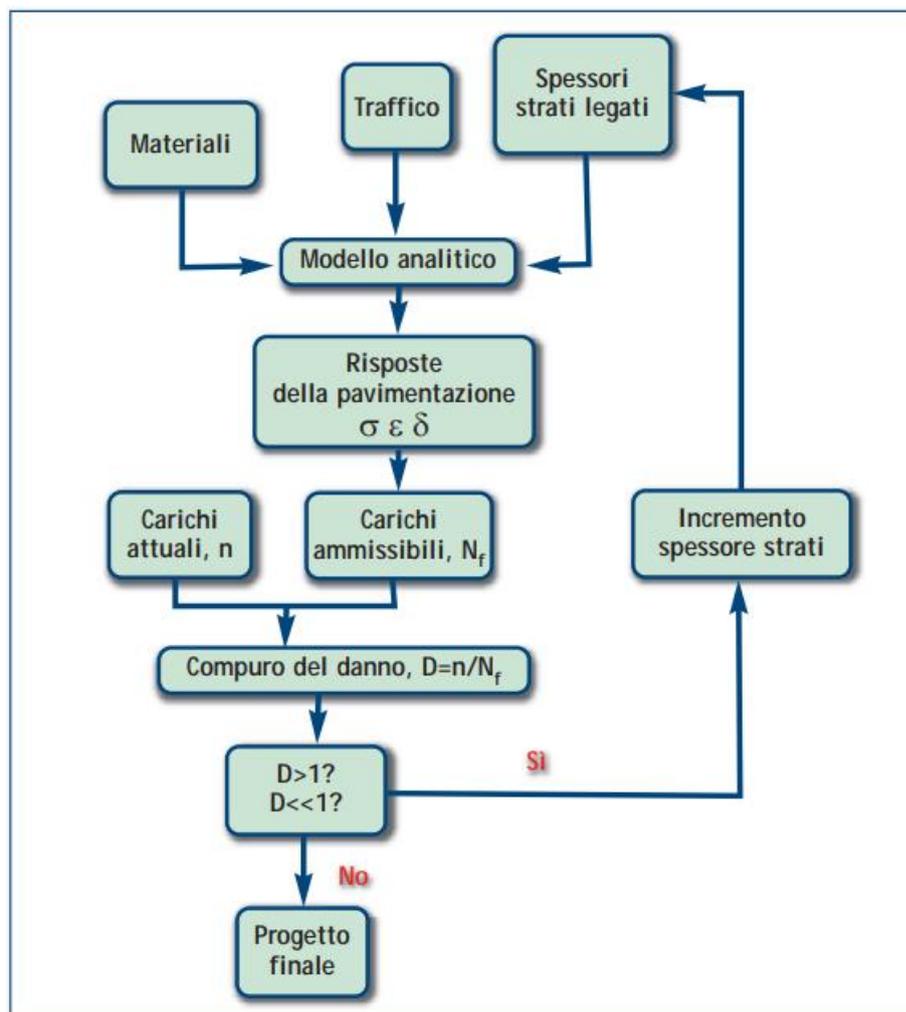


Figura 4 - Flow-chart per la progettazione delle pavimentazioni con il metodo empirico-meccanicistico

La figura 4 mostra il processo a cascata necessario per la progettazione. I materiali con le loro proprietà, i livelli di traffico e gli spessori degli strati legati sono i dati in input del modello rappresentante la pavimentazione. La risposta per questa determinata configurazione, in termini di sollecitazioni, deformazioni e spostamenti, è utile per stimare il numero consentito di carichi che portano a rottura (N_f). Si divide, poi, il numero di carichi di traffico previsti reale (n) per N_f in modo da determinare il danno (D) (Legge di Miner). Se il danno è uguale a 1, abbiamo la rottura della pavimentazione (generalmente quando si parla di rottura si intende in termini di fessurazione a fatica o ormaimento). L'obiettivo è ottenere un valore prossimo a 1, in modo da ottimizzare la progettazione, riducendo al minimo i costi e l'utilizzo delle materie prime. Nel caso in cui D fosse uguale o maggiore a 1, allora sarebbe necessario modificare i dati di input. In particolare, si possono variare i materiali utilizzati ma per lo più si andranno a modificare gli spessori dei diversi strati.

I modelli per la progettazione delle pavimentazioni perpetue pongono grande attenzione alle proprietà dei materiali costituenti, alla caratterizzazione della risposta della pavimentazione, alle condizioni ambientali e ai parametri di resistenza del sottofondo. Tutto ciò è necessario per:

- Avere una sufficiente integrità strutturale ed uno spessore tale per cui vengano impediti ammoramenti dovuti a rotture per fatica e la formazione di deformazioni permanenti;
- Essere sufficientemente duratura per resistere alle sollecitazioni del traffico e a quelle ambientali.

Nella progettazione delle pavimentazioni perpetue vengono definiti dei punti critici, in risposta alle sollecitazioni cui la sovrastruttura è sottoposta, al di sotto dei quali il danno strutturale non si accumula e quindi viene considerato nullo. In questo contesto, quindi, la maggior parte dei carichi previsti produce sollecitazioni, deformazioni e spostamenti inferiori a quelli che provocherebbero danni strutturali.

Nelle pavimentazioni perpetue, ogni strato assolve ad una funzione specifica e per questa ragione va progettata appositamente. Il pacchetto legante, in generale, è composto da tre strati. Dal più profondo verso la superficie, vi è uno strato di base, con la funzione di

resistere alle sollecitazioni a fatica, uno strato di collegamento, con la funzione di resistere all'ormaiamento, e uno strato di usura più superficiale, che deve essere progettato per sopportare il traffico e l'azione degli agenti atmosferici (figura 5).

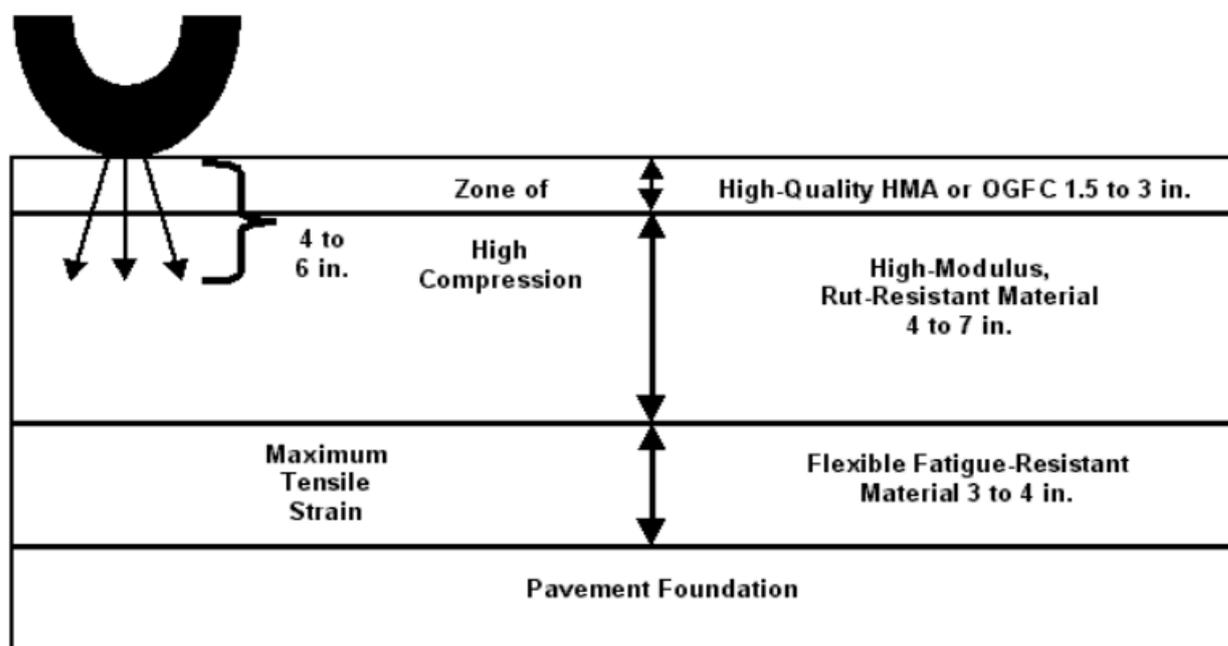


Figura 5 - Stratigrafia di una pavimentazione perpetua standard

Lo strato di base deve avere un'alta resistenza alla rottura a fatica, causata dall'azione ripetuta dei carichi veicolari. Come detto in precedenza, per la progettazione di queste pavimentazioni, esistono livelli critici sotto cui il danno è considerato nullo. Sono stati fatti studi di laboratorio per la determinazione del limite di resistenza a fatica, definito appunto come il livello di tensione sotto cui non vi è alcun danno cumulativo. Esso dipende da diversi fattori, come la temperatura, l'invecchiamento e la composizione della miscela. Proprio da ciò, si è notato che aumentando il contenuto di bitume, rispettando certi limiti, aumenta la resistenza a fatica della miscela permettendo alla miscela di essere compattata ad una densità superiore essendo il contenuto di legante tale da fornire un grado di flessibilità della miscela elevato, così da inibire la formazione e lo sviluppo delle fessure (figura 6a). Questo, in combinazione con un corretto spessore complessivo degli strati legati, garantisce una forte resistenza contro la risalita delle fessurazioni da fatica che si dipartono dallo strato inferiore, in quanto l'aumento del pacchetto legato fa sì che diminuisca la deformazione dovuta a trazione (figura 6b). Va però ricordato che se non vi è un'adeguata compattazione dello strato, tutte queste considerazioni vanno perse.

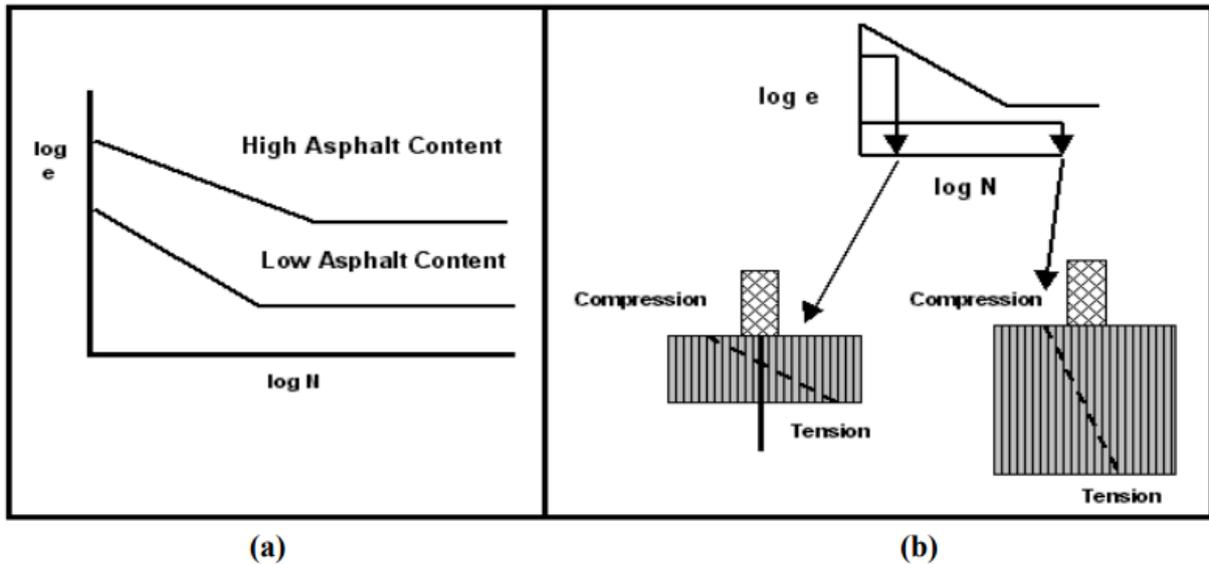


Figura 6 - Resistenza a fatica dello strato di base: (a) miglioramento della resistenza a fatica con l'aumento di contenuto di legante e (b) diminuzione delle tensioni di trazione con l'aumento dello spessore del pacchetto legato

In realtà, nello studio del limite di resistenza a fatica, si è notato che ad influire su questo valore non è tanto il contenuto di legante quanto il tipo. Un altro approccio per garantire la durata a fatica della pavimentazione è quello di ridurre al minimo la deformazione a trazione alla base degli strati legati in modo che il danno cumulativo non si verifichi. Questo permetterebbe anche di avere un unico mix design sia per lo strato di base che di collegamento. Studi suggeriscono anche di utilizzare bitume modificato con polimero SBS in percentuale variabile tra il 6 e il 7,5%, in modo da ridurre lo spessore della pavimentazione. Il polimero SBS è un elastomero termoplastico con un buon comportamento elastico, che gli permette di adattarsi a qualunque deformazione della sovrastruttura senza fessurarsi, e una buona lavorabilità alle basse temperature, migliorando la resistenza alle sollecitazioni meccaniche.

Lo strato di collegamento, che si interpone tra lo strato più superficiale di usura e lo strato di base, deve combinare le qualità di durata e stabilità. Quest'ultima si può conseguire andando a ridurre il contenuto di frazioni fini in modo da aumentare il contatto tra gli aggregati più grossi e quindi l'attrito interno. Bisogna però considerare che diminuire il contenuto di fine porta ad un aumento dei vuoti che a sua volta porta a segregazione e alla possibilità che i vuoti si riempiano di acqua. È necessario utilizzare un bitume con un elevato punto di rammollimento che conferisce allo strato la capacità di resistere alle forti

sollecitazioni di taglio indotte dai carichi veicolari. Ricordiamo che la funzione principale dello strato di collegamento nelle pavimentazioni perpetue è quella di avere una grande resistenza all'ormaiamento.

I requisiti dello strato di usura sono correlati alle condizioni di traffico e ambientali del sito. In linea generale, a livello prestazionale esso deve conferire un'adeguata resistenza all'ormaiamento e alle rotture superficiali, nonché conferire una buona aderenza pneumatico-superficie stradale e limitare fenomeni come l'acquaplaning. Nel presente lavoro di tesi sono state analizzate delle miscele in conglomerato bituminoso senza l'aggiunta di additivi, ma anche con l'aggiunta di un prodotto antighiaccio, essendo la pavimentazione destinata ad un sito in cui si raggiungono temperature molto basse. L'additivo si chiama Winterpave®, un prodotto di Iterchimica che si disperde omogeneamente nella miscela e serve a ritardare l'adesione del ghiaccio alla superficie stradale. Esso ha anche lo scopo di abbassare la temperatura di congelamento dell'acqua e inibisce il processo di formazione dei cristalli di ghiaccio.

Da quanto specificato finora, si possono notare alcune sostanziali differenze tra le pavimentazioni perpetue e le pavimentazioni flessibili classiche. Le seconde hanno una struttura standard in cui all'aumentare della profondità all'interno del pacchetto legante, aumentano gli spessori dei diversi strati, ma diminuisce il contenuto di legante. Nelle pavimentazioni perpetue, invece, essendo che la resistenza all'ormaiamento e alla rottura per fatica vengono migliorate, il contenuto di legante dello strato di base è molto simile a quello dello strato di collegamento.

2.2 Fenomeni di degrado strutturale

La sovrastruttura, dal momento in cui entra in funzione, è soggetta all'azione combinata del traffico veicolare e degli agenti atmosferici che ne inficiano l'integrità, fino al punto da generare dei fenomeni di degrado. Tra i più rilevanti abbiamo la rottura per fatica e l'ormaiamento.

2.2.1 Rottura per fatica



Figura 7 - Rottura a fatica di una pavimentazione

La rottura per fatica è un fenomeno nel quale, a causa dell'azione ripetuta e progressiva del traffico veicolare, si ha la formazione di crepe che interessano i diversi strati della pavimentazione. Questo fenomeno avviene alle temperature intermedie di esercizio in cui la miscela è rigida e fragile e per questo motivo tende più a fessurarsi che a deformarsi. Inizialmente le crepe hanno un aspetto tanto piccolo da non poter essere notate, ma l'applicazione continua dei carichi fa sì che queste aumentino in larghezza, lunghezza e profondità. Con il tempo se ne formeranno di nuove che a loro volta si svilupperanno ed entreranno in collegamento con quelle esistenti. A quel punto sulla superficie si noterà un pattern tipo pelle di coccodrillo (figura 7).

Studi hanno mostrato che esistono due tipi di fessure dovute alla rottura per fatica. Le prime sono le top-down, che si formano e propagano dalla superficie verso gli strati più profondi del pacchetto legato, ma che si è visto non essere molto dannose essendo che tendono a stabilizzarsi nei primi centimetri della pavimentazione (è molto spesso sufficiente eseguire una manutenzione della pavimentazione rimuovendo i primi centimetri e stendendo nuovo conglomerato bituminoso). Le seconde sono le bottom-up, senza dubbio le più critiche. Queste si formano alla base dello strato di base e tendono a raggiungere la superficie, creando gravissimi danni alla pavimentazione da un punto di vista strutturale ma anche economico.

Le fessure peggiorano le prestazioni della pavimentazione, ne indeboliscono la struttura, contribuendo a formare una pavimentazione irregolare (negli stadi finali porta al distacco

di pezzi di manto stradale, generando danni anche alla sicurezza dei guidatori). Permettono il passaggio di acqua e aria al suo interno, causando danni irreparabili. Per contrastare questo fenomeno è necessario prestare molta attenzione alla composizione della miscela. Miscele con un contenuto di legante maggiore hanno una resistenza a fatica maggiore. Un altro elemento impattante è il livello di compattazione: se la miscela ha un grado di compattazione troppo basso, viene ridotta la resistenza della superficie della pavimentazione ma si ha anche un alto contenuto di vuoti, all'interno dei quali l'acqua può insinuarsi.

2.2.2 Ormaiamento



Figura 8 - Fenomeno di ormaiamento su superfici stradali

L'ormaiamento è un fenomeno di degrado molto pericoloso per la sicurezza stradale perché, come mostrato in figura 8, la formazione di solchi profondi vincola il veicolo nella sua traiettoria, ostacolando la sterzata, ma anche perché gli stessi solchi, durante gli eventi piovosi, possono riempirsi d'acqua, creando problemi legati al fenomeno dell'acquaplaning.

Questo fenomeno è dovuto all'accumulo di deformazioni permanenti sulla superficie stradale. Infatti, i pneumatici dei veicoli, mentre passano sulla pavimentazione, generano delle piccole deflessioni che la superficie stradale non è in grado di assorbire del tutto. Le miscele in conglomerato bituminoso hanno un comportamento visco-elastico a causa del legante bituminoso presente al suo interno. Essendo anche termo sensibili, alle alte temperature di esercizio le miscele tendono a rammollire e la presenza dei veicoli che

transitano generano delle deformazioni che in parte non vengono recuperate. L'accumulo, dopo svariate applicazioni dei carichi, genera dei solchi che possono raggiungere i 20 mm di profondità.

Le cause principali possono essere di diverso tipo:

- Errori progettuali nella scelta dei materiali per la pavimentazione: contenuto di bitume eccessivo (che viene anche espulso dallo strato salendo in superficie e generando una perdita di aderenza pneumatico-pavimentazione), contenuto eccessivo di filler minerale all'interno della miscela (che non permette un sufficiente contatto pietra-pietra), scelta del legante non opportuna per il sito (non adatto alle alte temperature);
- Compattazione in fase di stesa non sufficiente: l'azione del traffico veicolare conclude la compattazione degli strati superficiali;
- Instabilità e cedevolezza degli strati legati più profondi che si ripercuote in superficie generando ormaie di dimensioni molto grandi.

I processi manutentivi varieranno con la causa che li ha creati. In alcuni casi sarà sufficiente effettuare il rifacimento dello strato più superficiale (usura), in altri casi sarà necessaria una ricostruzione totale del pacchetto legante.

3 Caratterizzazione delle miscele

La caratterizzazione delle miscele fa riferimento a quanto richiesto dal Capitolato Speciale d'Appalto per cui le miscele analizzate stesse sono state realizzate. Nelle pagine seguenti verranno descritte nel dettaglio tutte le prove necessarie alla caratterizzazione delle miscele da un punto di vista della composizione e della volumetria, nonché di alcune caratteristiche meccaniche. Gli interventi richiesti sono necessari alla riqualificazione di una sovrastruttura autostradale in tutte le sue parti, dallo strato di fondazione allo strato di usura. Nello specifico, sono state analizzate miscele degli strati di base, collegamento e usura, in diverse fasi della progettazione e realizzate in due impianti differenti. Le prove seguenti sono state elaborate nell'esatto ordine in cui vengono esposte. Questo flow-chart è stato reso necessario per poter ottenere una continuità di operatività e un controllo maggiore sui risultati.

3.1 Massima massa volumica teorica (MMVT)

La massima massa volumica teorica è una grandezza intrinseca della miscela, fondamentale per lo studio volumetrico delle miscele. Essa è la condizione per cui all'interno della miscela si raggiunge il grado di addensamento limite, ottenuto quando si ha una percentuale di vuoti nulla. Questa condizione è ovviamente fisicamente impossibile, perciò si parla di una grandezza "teorica". Per effettuare la prova, la norma di riferimento è la UNI EN 12697-5, all'interno della quale vengono definite tre procedure: volumetrica, idrostatica e matematica. In questo lavoro di tesi è stata adoperato il processo volumetrico (o anche metodo del picnometro) che consiste in diversi step:

1. *Taratura e pesatura dei picnometri*

Al primo step è necessario definire i valori di massa e volume dei picnometri utilizzati per la prova. I picnometri sono degli strumenti in vetro composti da una beuta e un tappo con beccuccio cavo allungato. Ogni picnometro viene pesato a vuoto e poi ripesato una volta riempito di acqua distillata e disareata, fino a generare un menisco convesso sulla parte terminale del beccuccio (una lente d'acqua con concavità verso il basso). Dividendo il valore delle masse ottenute per la densità dell'acqua alla

temperatura di prova, si ricava il volume di acqua all'interno del picnometro e di conseguenza il volume del picnometro stesso.

2. *Preparazione del campione di prova*

La prova viene effettuata su due campioni dello stesso materiale calcolando poi un valore medio rappresentativo. Si prelevano due campioni di materiale sciolto di una quantità definita dalla normativa dipendente dalla dimensione massima degli aggregati all'interno della miscela in esame. Sui campioni si effettua l'operazione di sgranamento, cioè si separano fisicamente i grani e gli agglomerati grossolani (la normativa impone di non avere agglomerati superiori ai 6 mm). In questo procedimento è necessario che la miscela sia in uno stato piuttosto morbido, perciò sarà necessario riscaldarla ad una temperatura di 110°C (figura 9).



Figura 9 - Sgranamento e divisione in due parti uguali della miscela in esame

3. *Riempimento dei picnometri e pesatura*

Una volta che i due campioni di materiale sciolto si sono raffreddati, si riempiono i picnometri con essi e infine si pesano, ottenendo il peso del picnometro più il mix.

4. *Riempimento dei picnometri con acqua e disareazione*

Il passaggio successivo è quello di riempire di acqua distillata i picnometri con all'interno la miscela. Il livello del pelo libero da raggiungere è circa 2-3 cm al di sopra del materiale. Dopo di che, si collegano i due picnometri ad un sistema di aspirazione dell'aria (disareatore), in modo da aspirare quella intrappolata all'interno. Tale processo richiede almeno 30 minuti, all'interno dei quali si procede manualmente a un dolce scuotimento dei picnometri (figura 10).



Figura 10 - Disareazione della miscela in acqua distillata

5. Determinazione del peso in acqua

Terminato il processo al punto 4, si conclude riempiendo i picnometri con acqua distillata e disareata fino all'estremità superiore del beccuccio, formando come al punto 1 un menisco convesso. Terminata questa operazione, è stato pesato il tutto, definendo la massa del picnometro con all'interno la miscela e l'acqua.

6. Calcolo della MMVT

Con tutti i dati a disposizione, è possibile completare la prova calcolando la massima massa volumica teorica utilizzando la formula definita all'interno della normativa di riferimento con il metodo volumetrico:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \times V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

Dove:

- ρ_{mv} è la MMVT in [Mg/m³] con approssimazione allo 0,001 Mg/m³;
- m_1 è la massa del picnometro comprensivo di beccuccio calcolata al punto 1, in [g];
- m_2 è la massa del picnometro comprensivo di beccuccio con all'interno la miscela (punto 3), in [g];

- m_3 è la massa del picnometro con beccuccio con all'interno la miscela in esame e l'acqua distillata e disareata (punto 5), in [g];
- V_p è il volume del picnometro (punto 1), in [m^3];
- ρ_w è la densità dell'acqua in [Mg/m^3] con approssimazione allo 0,001 Mg/m^3 .

Come detto in precedenza, il valore rappresentativo della massima massa volumica teorica della miscela in esame è definito dalla media dei valori ottenuti dai due campioni.

3.2 Contenuto di bitume

La determinazione del contenuto di bitume all'interno della miscela è eseguita facendo riferimento alla norma UNI EN 12697-39, all'interno della quale viene definito il processo per la sua valutazione tramite ignizione (metodo alternativo e più fattibile rispetto all'estrazione tramite solvente). La prova richiede l'utilizzo di un cestello e un forno, denominato carbolite, che lavora alla temperatura di 540°C e al cui interno è presente una bilancia capace di valutare le variazioni di peso. Di seguito gli step:

1. *Pesata a vuoto del cestello*

La prima operazione da compiere è quella di pesare il cestello vuoto, in modo da averne la tara che sarà utile nei passi successivi. Esso è in materiale metallico molto resistente alle alte temperature, composto da due livelli.

2. *Preparazione del campione di prova*

Il campione utilizzato per la determinazione della MMVT viene riutilizzato in questa fase. Per fare ciò, per prima cosa è necessario eliminare tutta l'acqua in eccesso per mezzo di un riscaldamento alla temperatura di 110°C in modo da farla evaporare. Il processo termina nel momento in cui non si notano più differenze di peso. Una volta raffreddato, il materiale viene posto in maniera omogenea sui due livelli del cestello per poi essere pesato, ottenendo la massa del cestello più il materiale. Per differenza si calcola il netto, cioè la massa del materiale $M_{\text{mix_net}}$ (figura 11). Il quantitativo di materiale da inserire all'interno del cestello è stabilito dalla norma di riferimento.



Figura 11 – Posizionamento della miscela nel cestello e valutazione della massa del cestello più la miscela

3. Esecuzione della prova

Il campione al punto 2 viene inserito sulla bilancia all'interno della carbolite nel momento in cui essa ha raggiunto la temperatura di 540°C (circa 3 ore dall'accensione della macchina). A quel punto si fa partire la prova e inizia il processo di combustione del legante bituminoso con perdita di massa. Dopo circa 30 minuti (il tempo è variabile) termina la prova in quanto la bilancia non registra più significative variazioni di peso.

4. Pesatura del campione post prova

Una volta terminata la prova, si lascia raffreddare il cestello con quello che ne è rimasto del campione, cioè la miscela priva del legante. In seguito, si pesa il tutto, da cui poi si ricava per differenza il peso netto degli aggregati M_{agg_net} (figura 12). A sua volta, la differenza tra la massa della miscela netta prima della prova e quella post prova, fornisce il valore del quantitativo di bitume perso B_{perso} .



Figura 12 - Miscela post carbolite (solo aggregati e filler)

5. Calcolo della percentuale di bitume

A questo punto, molto semplicemente, si sfruttano le seguenti formulazione per ottenere la percentuale di bitume rispetto alla miscela e la percentuale di bitume rispetto gli aggregati:

$$\%B(mix) = \frac{M_{mix_net}}{B_{perso}} * 100$$

$$\%B(agg) = \frac{M_{agg_net}}{B_{perso}} * 100$$

Nella realtà, all'interno delle miscele in conglomerato bituminoso analizzate, vi è la presenza di compound polimerici (in percentuale rispetto agli aggregati %P) che durante la procedura di ignizione vengono bruciati a loro volta e del tutto. Per tenerne conto, la formulazione da utilizzare è la seguente:

$$\%B(mix) = \frac{M_{mix_net} - \%P * M_{mix_net}}{B_{perso}} * 100$$

$$\%B(agg) = \frac{M_{agg_net} - \%P * M_{agg_net}}{B_{perso}} * 100$$

3.3 Analisi granulometrica delle miscele

L'analisi granulometrica permette di determinare la distribuzione degli aggregati all'interno delle miscele. Questo avviene per mezzo del metodo della vagliatura, normato dalla UNI EN 12697-2 ma, allo stesso tempo, si fa riferimento al Capitolato Speciale d'Appalto di riferimento che definisce i fusi granulometrici da rispettare. Di seguito sono riportate le tabelle che definiscono i fusi dei diversi strati della pavimentazione (figure 13-15):

Dimensione dello staccio [mm]	Passante [%]
31,5	100
20	70-95
16	58-85
12,5	47-73
10	40-66
8	35-59
4	25-44
2	18-35
1	12-28
0,5	8-22
0,063	4-8

Figura 13 - Prescrizioni relative alla curva granulometrica del conglomerato bituminoso per strato di base

Dimensione dello staccio [mm]	Passante [%]
20	100
16	84-94
12,5	67-87
10	57-80
8	50-74
4	35-55
2	25-38
1	18-30
0,5	12-22
0,063	4-8

Figura 14 - Prescrizioni relative alla curva granulometrica del conglomerato bituminoso per strato di collegamento

Dimensione dello staccio [mm]	Passante [%]
16	100
12,5	90-100
8	70-90
4	40-55
2	25-38
0,5	14-20
0,25	10-15
0,063	6-10

Figura 15 - Prescrizioni relative alla curva granulometrica del conglomerato bituminoso per strato di usura

La procedura per la definizione delle curve granulometriche per i diversi strati si articola nei seguenti step:

1. Lavaggio ed essiccamento degli aggregati

Come detto in precedenza, le prove per la caratterizzazione delle miscele sono a cascata. Per questo motivo, il campione da utilizzare per la vagliatura è lo stesso che deriva dal processo di ignizione (di cui si conosce la massa). Il materiale, però, non viene immediatamente sottoposto a setacciatura ma viene preventivamente lavato, in modo da rimuovere gran parte del filler che verrà poi valutato a posteriori una volta asciugato il campione restante. Per il lavaggio si utilizzano due setacci, uno con apertura delle maglie da 2 mm e uno da 0,063 mm. Si inserisce tutto il materiale (preventivamente posto in una teglia da aggregati in seguito alla pulizia mediante pennelli dei cestelli utilizzati per la carbolite) all'interno del setaccio da 2 mm posto al di sopra di quello da 0,063 mm. In seguito, con acqua corrente, si inizia a lavare manualmente il materiale. Finché l'acqua che scorre dalla parte inferiore del setaccio da 0,063 mm non risulterà limpida, l'eliminazione del filler non è terminata, per cui si procederà finché ciò non avverrà. Una volta terminata questa operazione, si pone tutto il materiale bagnato all'interno della teglia, facendo attenzione a non perdere nemmeno un elemento (verrebbe considerato filler), per poi lasciarlo in forno a 105°C per almeno 12 ore, come definito dalla normativa (figura 16).



Figura 16 – Agregati posto lavaggio ma pre essiccazione in stufa

2. Processo di setacciatura

Una volta che gli aggregati asciugati raggiungono la temperatura ambiente, è possibile procedere alla vagliatura. Utilizzando i setacci definiti del Capitolato Speciale d'Appalto, si posizionano uno sopra l'altro a formare una colonna verticale in cui la maglia dei setacci è crescente dal basso verso l'alto. Una volta posizionato sull'estremo inferiore un fondello e sull'estremo superiore un coperchio e preventivamente definite le tare dei singoli setacci, compreso il fondello, è possibile posizionare la colonna all'interno di un agitatore meccanico. Una volta azionato, per 10 minuti imprime un moto vibrazionale alla colonna, permettendo agli aggregati di muoversi verso il basso tra i diversi setacci (figura 17). Una volta terminato il processo, sarà necessario fare un controllo manuale dell'effettiva riuscita da parte dell'agitatore. Per le pezzature più grossolane, sarà necessario verificare rapidamente che tutto ciò che poteva passare ai diversi setacci è passato.



Figura 17 – Setacci in colonna durante l'azione dell'agitatore meccanico

3. Pesatura e definizione del passante progressivo

Terminato il processo di vagliatura, sarà necessario pesare i singoli setacci con all'interno gli aggregati che sono stati trattieneuti. Per mezzo della tara dei setacci si potrà determinare il trattenuto netto all'interno di ogni singolo setaccio. Dal trattenuto progressivo, espresso in termini percentuali (cioè moltiplicando per 100 e dividendo per la massa totale del trattenuto compreso del filler perso durante il lavaggio e quello trattenuto dal fondello), si ricava il passante progressivo (che è semplicemente il complemento a 100). Per concludere, si riporta su un grafico semi logaritmico il passante progressivo e i limiti del Capitolato Speciale d'Appalto in funzione dell'apertura dei vagli, costruendo la curva granulometrica del campione e valutandone la corrispondenza con il fuso di riferimento.

3.4 Massima massa volumica teorica degli aggregati

Per la determinazione della massa volumica degli aggregati si fa riferimento alla stessa procedura del capitolo 3.1. L'unica accortezza riguarda il processo di disareazione, che deve essere effettuato a distanza di qualche ora dall'aggiunta di acqua distillata nei picnometri, in modo che gli aggregati più fini decantino.

3.5 Compattazione con pressa a taglio giratorio

Come richiesto dal Capitolato Speciale d'Appalto, si valutano le caratteristiche volumetriche delle diverse miscele per i diversi strati. Lo scopo è di simulare in laboratorio i fenomeni che avvengono in situ durante la fase di compattazione da parte dei rulli compattatori. Per fare ciò, è necessario l'utilizzo di una macchina chiamata pressa a taglio giratorio. Questo strumento è nato nell'ambito del programma SHRP ed è del tutto innovativo rispetto alla tecnica di compattazione Marshall, essendo molto più rappresentativo dell'effetto dei rulli, oltre al fatto che permette di valutare la lavorabilità della miscela insieme al grado di addensamento. Il sistema, normato dalla UNI EN 12697-31, è composto da una macchina dotata di pistone all'interno della quale si posizionano le fustelle in acciaio (con diametro di 100 o 150 mm) riempite di materiale. La pressa giratoria, ruotando, compatterà il campione, sul quale poi sarà possibile effettuare delle prove meccaniche. Infatti, nell'ambito di questa tesi, sono stati realizzati campioni di dimensioni differenti a seconda della prova meccanica da compiere. Di seguito viene spiegato nel dettaglio tutto il processo che porta alla loro realizzazione:

1. Preparazione delle fustelle e del quantitativo di materiale da inserire all'interno di esse

Il primo passo è quello di prendere la fustella e la miscela sciolta in conglomerato bituminoso proveniente dall'impianto e portarli alla temperatura di 160°C. Generalmente la temperatura a cui vengono compattati i campioni è questa detta, ma può variare a seconda delle richieste dei diversi Capitolati. Nel caso in esame è richiesta una temperatura di compattazione pari a 160°C. Quando la temperatura richiesta è stata raggiunta (il controllo viene effettuato per mezzo di sonde collegate ad un termometro laser), si riempiono le fustelle con il materiale, previo

posizionamento di un filtro separatore tra la base della fustella e la miscela. Il quantitativo in massa da inserire è definito anch'esso dalle normative, per mezzo della seguente formulazione:

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

Dove:

- M è la massa della miscela da introdurre all'interno della fustella, in [g];
- D è il diametro interno della fustella, in [mm];
- ρ_M è la MMVT, in [Mg/m³];
- h_{\min} è il valore di altezza minima che corrisponde ad avere una percentuale di vuoti pari a zero, in [mm]. Il valore di altezza minima dipende dal rapporto h_{\min}/D , che deve essere compreso tra 0,66 e 1,05.

Una volta fatto ciò, si posiziona un altro filtro all'estremità superiore su cui verrà poggiato il tappo in acciaio, che andrà a diretto contatto con il pistone della pressa. Fatto ciò, si rimette in forno il sistema e si attende che ritorni alla temperatura di compattazione di 160°C (figura 18).



Figura 18 - A sinistra: riscaldamento della miscela e delle fustelle; a destra: riempimento della fustella con conglomerato bituminoso

2. Compattazione

La fase successiva è quella di compattazione con la pressa giratoria. Le fustelle riempite di materiale, alla temperatura di 160°C, vengono inserite all'interno della macchina (previa lubrificazione dei punti di contatto fustella-pressa). A questo punto, si aziona il sistema che applica due forze, una verticale di 600 kPa per mezzo del pistone, e una di taglio a seguito della rotazione della fustella all'interno della macchina (30 giri/60 s) con un'inclinazione di 1,25° rispetto alla verticale (figura 19). Questa doppia azione simula in maniera efficace quello che avviene in situ nella fase di compattazione da parte dei rulli. Per mezzo di un software collegato alla macchina, vengono registrati i valori di altezza ad ogni giro, così poi da avere la capacità di determinare il grado di addensamento e di lavorabilità della miscela.

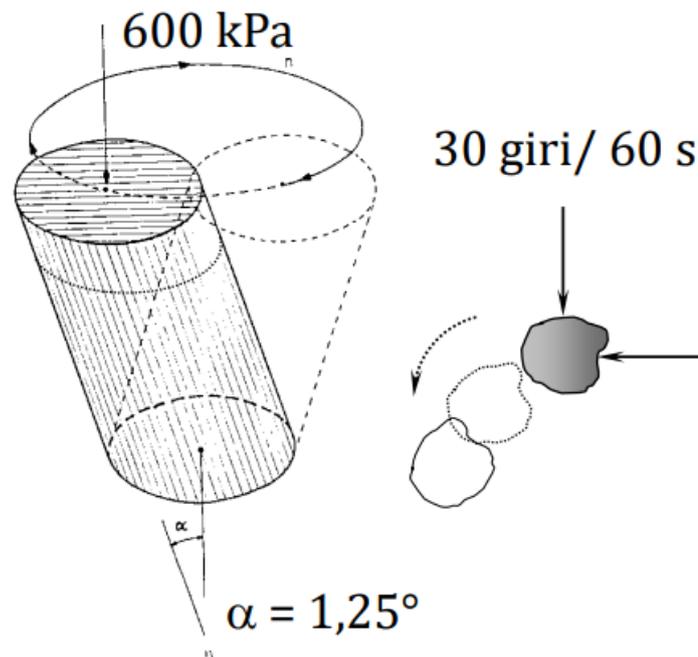


Figura 19 - Rappresentazione schematica del funzionamento della pressa a taglio giratorio

Per concludere, si sottolinea che il funzionamento della pressa è di due tipi: compattazione a numero di giri e compattazione ad altezza. Nel primo caso, si fissa il valore di numero di giri da raggiungere (generalmente definito dal Capitolato Speciale d'Appalto) e si ottiene un certo valore di altezza finale. All'interno di questo lavoro di tesi, questo metodo è utilizzato per la caratterizzazione volumetrica delle miscele. Nel secondo caso, si fissa il valore di altezza da raggiungere, indipendentemente dal numero di giri. Questa opzione viene utilizzata per la realizzazione dei campioni per le prove meccaniche (figura 20).

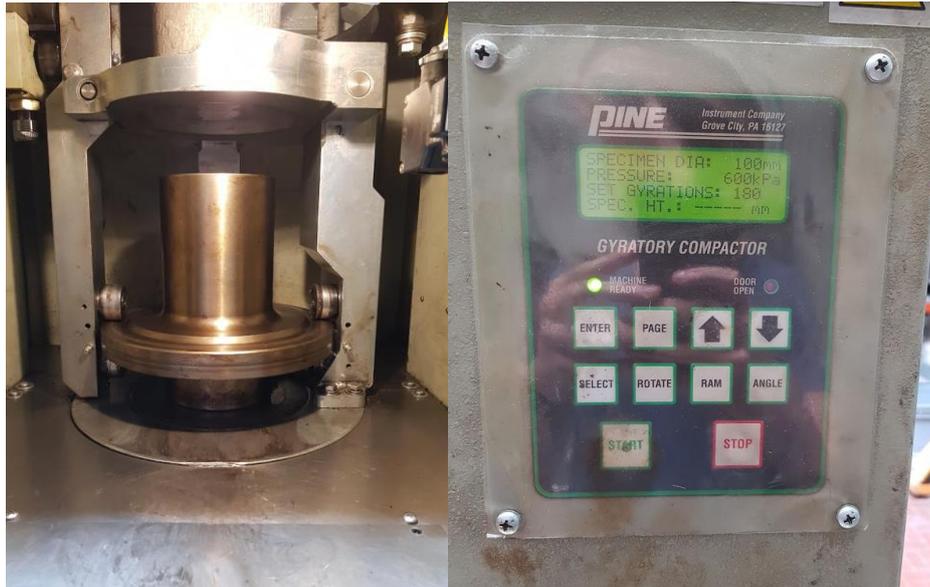


Figura 20 - A sinistra: fustella all'interno della pressa giratoria; a destra: esempio di impostazione della macchina per compattazione a numero di giri

3. Estrusione del provino compattato

Terminata la prova, la fustella viene estratta dalla pressa giratoria e posizionata su un pistone idraulico che, azionandolo, permette di sfilare il campione dall'alto. In questa fase è importante non estrarlo troppo velocemente perché lo sbalzo termico assieme al peso del campione potrebbero farlo collassare (soprattutto per campioni molto grandi). Dopo di che, si lascia raffreddare il campione a temperatura ambiente (figura 21).



Figura 21 - A sinistra: campione durante l'estrusione; a destra: tre campioni finiti lasciati raffreddare

4. Costruzione delle curve di compattazione e vuoti all'interno del campione

Con i dati ottenuti dalla compattazione, è possibile costruire le curve di compattazione. Si riportano i dati su un grafico semi-logaritmico che ha sull'asse delle y il grado di compattazione C in percentuale e sull'asse delle x il numero di giri impiegati. La relazione che lega queste due grandezze è la seguente:

$$C(\%) = C_1(\%) + k \log_{10} N$$

Dove C_1 è l'addensamento registrato al primo giro di compattazione (autoaddensamento), mentre k rappresenta la lavorabilità (figura 22).

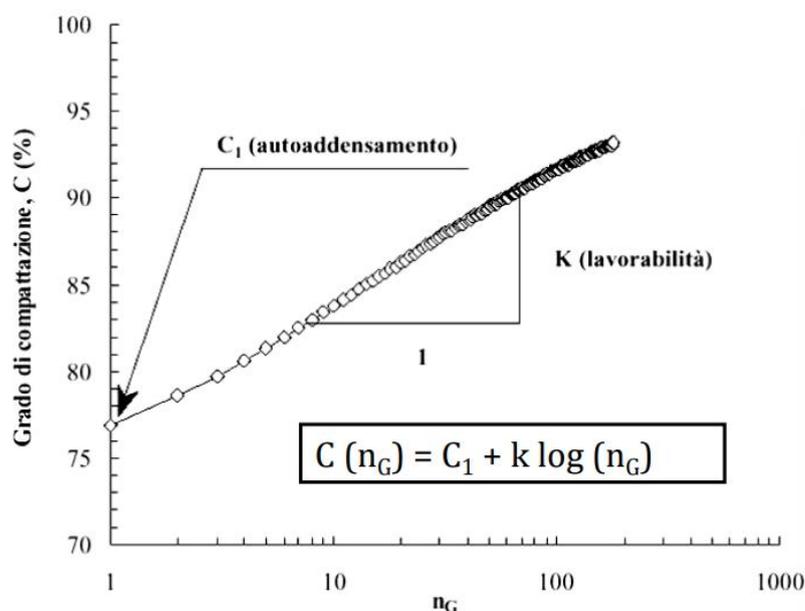


Figura 22 - Curva di compattazione

Tramite le curve di compattazione è possibile definire anche il contenuto di vuoti reali, per un dato numero di giri, all'interno del campione compattato. È molto utile perché spesso all'interno dei Capitolati Speciali d'Appalto è richiesto che vengano rispettati contemporaneamente specifiche percentuali di vuoti a specifici numeri di giri, come nel caso in esame: a seconda dello strato della pavimentazione analizzato, bisogna rispettare determinati limiti a 10, 100 e 180 giri. Per la loro determinazione, il procedimento è il seguente:

- Determinazione del volume geometrico del campione:

$$V_x = \pi \frac{D^2}{4} h(n_G)$$

- Percentuale di compattazione in cui non si considera l'effetto parete dovuto alla non perfetta aderenza campione-fustella:

$$C_{ux}[\%] = \frac{\frac{M_{effettiva}}{V_x}}{MMVT} \cdot 100$$

- Percentuale di compattazione considerando l'effetto parete ed in funzione del volume geometrico per il numero di giri finale:

$$C_x[\%] = \frac{C_{ux} \cdot MV \cdot V_{x_{finale}}}{M_{effettiva}}$$

- Percentuale di vuoti del campione:

$$v[\%] = 100 - C_x$$

3.6 Massa volumica (MV)

La massa volumica del campione compattato con tecnica giratoria è una sua proprietà necessaria per la definizione dei vuoti, che poi verranno confrontati con quelli definiti da Capitolato. A differenza della massima massa volumica teorica, questa rappresenta la densità reale del campione. Per determinarla, si fa riferimento alla norma UNI EN 12697-6, che ne definisce diverse procedure. Quella utilizzata all'interno del lavoro di tesi è la seguente:

1. *Determinazione della massa del campione secco*

Una volta che il campione compattato con la pressa giratoria ha raggiunto la temperatura ambiente, è possibile pesarlo e definire la massa m_1 .

2. *Determinazione della massa del campione in acqua*

Il passaggio successivo è quello di inserire il campione all'interno di una vasca riempita d'acqua, in modo che i vuoti d'aria vengano riempiti del tutto di acqua. Questa fase può durare dai 30 ai 60 minuti, per questa ragione è opportuno scuotere i campioni per permetterne un completo riempimento (figura 23). Trascorso questo tempo si pesa il campione per mezzo di un braccio che si trova immerso nella vasca, ricavando la massa m_2 . Inoltre, è necessario misurare con un termometro la temperatura dell'acqua, da cui se ne ricaverà la densità per mezzo della seguente formulazione:

$$\rho_w = \frac{-0,00532 * T_w^2 + 0,00759 * T_w + 1000,25205}{1000} \left[\frac{Mg}{m^3} \right]$$



Figura 23 - Campioni immersi in acqua: seconda fase del processo per ricavare MV

3. *Determinazione della massa del campione con superficie satura secca*

Effettuata la pesata al punto 2, si estrae il campione dall'acqua e molto velocemente si asciuga la superficie esterna con un panno umido in camoscio. Dopo di che, si pesa il campione determinando la massa m_3 .

4. *Determinazione della MV e della percentuale di vuoti*

Il calcolo della massa volumica a questo punto è determinato dalla seguente formulazione:

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

Per il calcolo della percentuale di vuoti invece, si fa riferimento a:

$$v[\%] = \frac{\rho_{mw} - \rho_{bssd}}{\rho_{mw}} * 100$$

3.7 Rigidezza nella configurazione di trazione indiretta

Una delle proprietà fondamentali e più caratterizzanti delle miscele in conglomerato bituminoso è la rigidezza, che rappresenta la capacità di ridistribuire le tensioni agli strati sottostanti. Infatti, gli strati superficiali in conglomerato bituminoso lavorano come un pacchetto legato, ognuno con caratteristiche diverse ma con lo scopo di trasferire il minor carico possibile, proveniente dai carichi veicolari, agli strati sottostanti.

Il conglomerato bituminoso, però, è un materiale definito visco-elastico lineare e per questo motivo non è possibile valutarlo con la classica formulazione sforzo/deformazione perché si tratterebbe di un'approssimazione del tutto eccessiva. Per natura, il suo comportamento varia a seconda del carico applicato, del tempo di carico, della frequenza e della temperatura. A questo proposito si fa riferimento al modulo complesso E^* , più rappresentativo del comportamento delle miscele.

Le prove di caratterizzazione delle miscele bituminose in riferimento alla rigidezza sono varie e sono tutte definite all'interno della norma UNI EN 12697-26. Esse si differenziano a seconda del tipo di sollecitazione applicata (controllo di tensione o deformazione), a seconda del modo in cui essa viene applicata (carico sinusoidale, impulsivo o costante) e a seconda della configurazione di prova (figura 24).

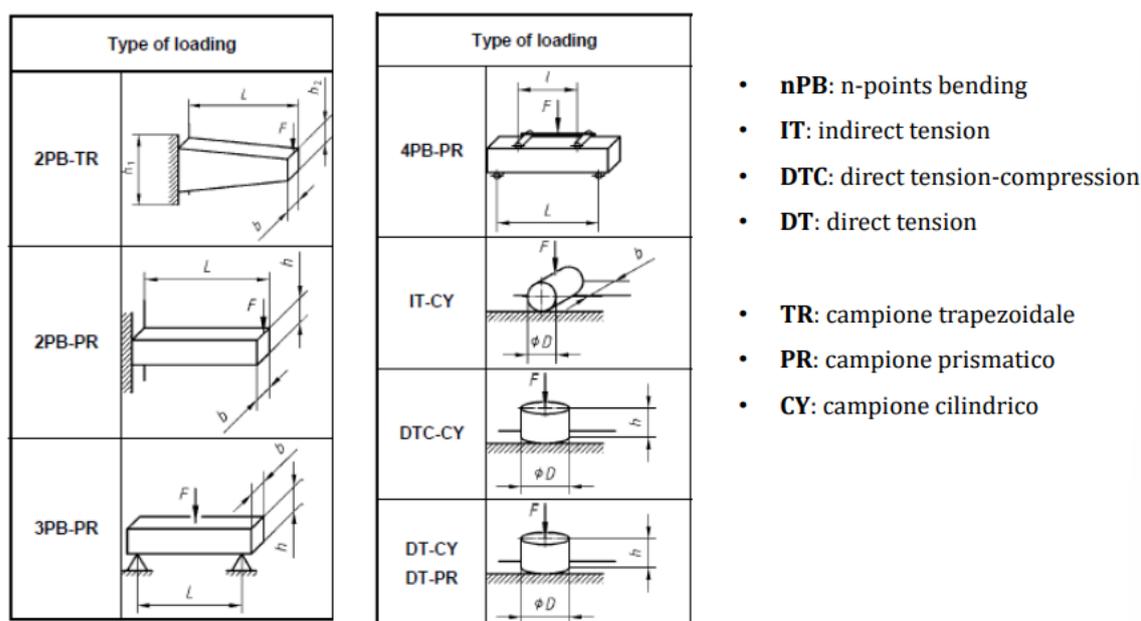


Figura 24 - Configurazioni di prova per la valutazione della rigidezza

In questo elaborato di tesi, in riferimento al Capitolato Speciale d'Appalto, si esegue la prova per la valutazione della rigidità nella configurazione di trazione indiretta su campioni cilindrici. Essa viene utilizzata per valutare la componente resiliente del modulo elastico, cioè quella componente che viene recuperata durante i cicli di carico e scarico (la prova, infatti, è di tipo impulsivo). Si è reputato opportuno, in questa circostanza, utilizzare la prova come metodo di confronto per analizzare l'aggiunta dell'additivo antighiaccio nello strato di usura. Esso dovrebbe abbassare solo la temperatura di congelamento, mantenendo invariate le proprietà della miscela. Perciò, si sono valutate solo due miscele dello strato di usura provenienti dallo stesso impianto ma in cui una presentava l'aggiunta del winterpave®, l'altra no.

Seguendo la normativa, sono stati realizzati tre campioni cilindrici per ogni mix di dimensioni 100 mm in diametro e 50 mm in altezza. Il Capitolato richiedeva, inoltre, che tutte le prove meccaniche venissero eseguite su campioni con una densità pari al 98% della densità ottenuta sul campione compattato con pressa a taglio girevole a 100 giri. Per motivi temporali, si è optato per considerare un range di errore del $\pm 1\%$.

La prova è stata effettuata con l'ausilio della macchina UTM-30. Essa è composta da una cella climatica all'interno della quale vi è un attuatore, che applica il carico desiderato per mezzo di un impianto idraulico che lo fa muovere verticalmente, e una traversa, su cui si poggia il campione. In questo caso, il campione viene montato su un castelletto (come in figura 25) e viene collegato a dei trasduttori LVDT, che ne misurano la deformazione sotto carico.



Figura 25 – A sinistra: UTM-30; a destra: configurazione del campione compattato e del castelletto

La prova viene eseguita nel seguente modo:

1. Condizionamento

La prova viene eseguita a temperature diverse, per valutare la variabilità del modulo resiliente con la temperatura. In questo caso è stato necessario condizionare sia i campioni che la cella climatica della UTM-30 a 10°C, 20°C e 30°C (come definito da Capitolato). Il tempo di condizionamento è definito dalla norma di riferimento.

2. Configurazione di prova

Il campione viene inserito nel castelletto come in figura 24, posizionando all'estremità superiore una barra di carico. In seguito, viene collocato all'interno della macchina, al di sotto dell'attuatore. Si inseriscono poi i trasduttori negli appositi fori, in modo che siano a contatto con il campione stesso e che siano nella corretta configurazione. Questa è definita da un software collegato alla UTM-30, attraverso cui si danno i comandi per l'esecuzione della prova. Si deve configurare anche il software, inserendo i dati opportuni relativi al campione (le altezze in quattro punti e il diametro), alla temperatura di prova, al tempo di carico (definito come il tempo che intercorre tra l'inizio di applicazione del carico e il

raggiungimento del picco. Nel caso in esame vale 125 ms) e al carico iniziale da applicare (figura 26).



Figura 26 - Configurazione di prova

3. Esecuzione

Una volta che il tutto è configurato nel modo corretto, si può far partire la prova. L'attuatore inizialmente darà cinque impulsi di condizionamento, dopo di che registrerà i dieci colpi seguenti. I trasduttori misureranno la deformazione orizzontale dovuta al carico applicato, determinando quindi il modulo resistente ad ogni impulso e calcolandone il valore medio. Il software calcola il modulo resiliente secondo la norma:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}$$

Dove:

- F è il carico applicato;

- ν è il modulo di Poisson;
- z è la deformazione orizzontale misurata;
- h è l'altezza media del campione.

La prova va ripetuta anche ruotando il campione di 90° , in modo da verificare che il valore ottenuto non sia troppo differente.

3.8 Modulo dinamico

Un altro metodo utilizzato per la valutazione della rigidità è quella della configurazione in compressione uniassiale. Si parla quindi del modulo dinamico, definito come la norma del modulo complesso E^* . Come detto in precedenza, le miscele in conglomerato bituminoso hanno un comportamento visco-elastico lineare variabile con la temperatura. Per questa ragione, il modulo complesso è composto di due parti: la componente reale E_1 , che riassume le proprietà elastiche del materiale, e la componente E_2 , che invece ne riassume le caratteristiche viscosi. Il valore di E^* è definito come:

$$E^* = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Esso cresce al diminuire della temperatura e al crescere della frequenza di carico, mostrando un comportamento della miscela di tipo elastico. Al contrario, al crescere della temperatura e al diminuire della frequenza di carico, il modulo complesso diminuisce, mostrando un comportamento del materiale di tipo viscoso.

Nella procedura per la definizione del modulo dinamico, i campioni sono soggetti ad una tensione di compressione uniassiale sinusoidale controllata, a varie frequenze. La temperatura di prova è definita dal Capitolato Speciale d'Appalto e, in questo caso, le miscele sono state valutate a 4°C, 20°C e 40°C. La sollecitazione applicata viene combinata con la deformazione assiale misurata, in funzione del tempo, per calcolare il modulo dinamico e l'angolo di fase. La prova può essere condotta sia in condizione di pressione confinata che non (come fatto in questo caso).

All'interno del lavoro di tesi, è stato scelto di focalizzarsi solo su alcune miscele dello strato di usura e binder per valutare questo parametro. Queste miscele sono quelle che, dall'analisi compositiva e volumetrica, hanno mostrato i risultati migliori. Il tutto sarà spiegato meglio nel capitolo opportuno.

3.8.1 Preparazione dei campioni

La normativa prevede la realizzazione di campioni di diametro 100 mm e altezza 150 mm ma, per motivi logistici-organizzativi, si è operato con provini di dimensioni 94 mm in diametro e 130 mm in altezza. Per ogni miscela esaminata sono stati realizzati due campioni, in modo da poter verificare la correttezza di lavorazione. Il Capitolato, come specificato in precedenza, richiede per tutte le prove meccaniche la realizzazione di campioni con una densità pari al 98% della densità che si ottiene da campioni compattati con pressa giratoria a 100 giri. Di seguito viene spiegato nel dettaglio tutto il processo che porta al loro confezionamento:

1. Compattazione con pressa giratoria

Uno dei problemi principali nel confezionamento di campioni in laboratorio è legato all'effetto parete e alla disomogeneità di vuoti tra i due estremi, superiore e inferiore, del campione. Entrambi sono dovuti alla modalità di compattazione, quindi legati alla pressa a taglio giratorio. Un buon metodo è quello di realizzare campioni di dimensioni maggiori rispetto a quelle desiderate e poi con dei procedimenti andare a estrapolare il cuore del campione stesso, che avrà caratteristiche molto più omogenee.

A questo proposito, compattando ad altezza con la pressa giratoria, si sono realizzati campioni cilindrici di dimensione 150 mm in diametro e 180 mm in altezza (figura 27). Per la definizione della massa da inserire all'interno della fustella, si è sfruttato il ragionamento seguente: la percentuale di vuoti del campione esterno è sicuramente maggiore del campione finale che si otterrà. Dall'esperienza, si è visto che questo $\Delta\%v$ si aggira attorno al 3-4% (infatti i valori percentuali utilizzati in quest'analisi variano in quel range). Allora, si ricava la massa da inserire all'interno della fustella come:

$$M_{trial} = 10^{-3} * \pi * 180 * 75^2 * MMVT * \left(1 - \frac{(\%v_{98\%} + \Delta\%v)}{100}\right) \quad [g]$$



*Figura 27 - Campione compattato ad altezza con pressa a taglio giratorio di dimensioni
150X180 mm*

2. Calcolo della MV del campione

Per tracciare tutto il lavoro e per verificare la correttezza del quantitativo in massa inserito nelle fustelle, è necessario valutare la massa volumica dei campioni da 150X180 mm. Questo è necessario perché la variabilità di lavorazione, della miscela e di operatività è molto grande e perciò va sempre controllata. Il processo è analogo a quello spiegato nel sotto capitolo 3.6.

3. Carotaggio e taglio delle basi

Il passaggio successivo è quello di realizzare il campione di 100X130 mm. Per farlo, si utilizzano due macchine: la carotatrice e la taglierina. La prima viene utilizzata per ridurre il diametro da 150 mm a 100 mm. Essa è dotata di un supporto su cui viene poggiato il campione, con la base del campione compattato rivolta verso il basso, e la carotatrice stessa dotata di lama diamantata. Mediante un sistema del tipo in figura 28, la carotatrice viene messa in moto e ruotando e abbassandosi manualmente a velocità costante mediante manovella, mentre viene mantenuta a temperatura per mezzo di acqua, attua la sua funzione, generando un campione di 100 mm in diametro e 180 mm in altezza. In realtà il diametro interno misurato è di circa 94 mm.



Figura 28 - Carotatrice con campione nella configurazione corretta per l'avviamento della prova

Una volta effettuato ciò, si passa al taglio delle basi mediante taglierina, una sega circolare a lama diamantata. Posizionato il campione nella configurazione di prova, si avvia la macchina composta dalla lama rotante posta al livello del taglio da effettuare sul campione e, per gravità, lo finisce (figura 29). Anche in questo caso il sistema è mantenuto alla temperatura idonea per mezzo di acqua corrente. I tagli effettuati sulle due basi hanno profondità differenti, questo per tener conto della minor compattazione della testa del campione. Perciò, si effettua un taglio di 35 mm all'estremità superiore e un di 15 mm all'estremità inferiore.



Figura 29 - Campione carotato durante il processo di taglio di una delle due basi

4. Verifica delle caratteristiche volumetriche richieste

Il campione finito (carotato e tagliato) assume la forma mostrata in figura 30. Il passaggio successivo è la verifica del contenuto di vuoti target. Se non rispettata, sarà necessario procedere all'elaborazione di un nuovo quantitativo di massa da inserire nelle fustelle con conseguente compattazione, carotaggio e taglio. Il controllo si effettua calcolando la massa volumica del campione. In processo seguirà degli step leggermente diversi rispetto alla procedura standard. Infatti, essendo già bagnato a causa del carotaggio e il taglio, sono state effettuate prima le pesate in acqua e quella del campione saturo a superficie secca, dopo di che la pesata del campione secco. Per poter fare ciò, esso viene posto in cella climatica a 35°C finché tutta l'acqua non evapora (controllo della variabilità del peso: quando, a distanza di almeno due ore, il peso varia solo dell'1%, allora lo si considera del tutto asciutto).



Figura 30 - Campione finito durante il controllo della completa evaporazione dell'acqua

5. Preparazione dei campioni per la prova di modulo dinamico

L'ultimo step manuale è quello dell'incollaggio dei dadini che sosterranno i morsetti su cui verranno montati i trasduttori per la misurazione della deformazione assiale. Per l'incollaggio si utilizza un sistema a tre bracci mobili: su di essi viene montata una barra sui cui vengono avvitate i dadini, posti tra loro sulla stessa verticale ad una distanza di 100 mm l'uno dall'altro. Al centro dei tre bracci si posiziona il campione e, applicando la colla epossidica (adesivo bicomponente creato dall'unione di colla e indurente, ad incollaggio ultrarapido) e azionando il sistema di aria compressa, si otterrà il risultato finale (figura 31). Dopo di che, sarà sufficiente smontare il sistema affinché rimangano attaccati al campione solo i dadini.

A questo punto, si possono condizionare tutti i campioni alla temperatura richiesta per il lasso di tempo definito dalla normativa.



Figura 31 - Campione finale durante il processo di incollaggio dei dadini

3.8.2 Esecuzione del test

La prova viene eseguita in regime non confinato con la stessa macchina utilizzata per la definizione della rigidità in configurazione di trazione indiretta e campione cilindrico, cioè la UTM-30. La differenza principale è nel software utilizzato, ma anche nella configurazione di prova. Infatti, come detto in precedenza, sui campioni dotati di dadini vengono montati i porta trasduttori, all'interno dei quali si inseriranno i trasduttori per la misurazione delle deformazioni verticali. Per la prova si fa riferimento a diverse norme, in particolare la AASHTO T 378-17 e la AASHTO T342-11. Il test segue questi passaggi:

1. Preparazione del campione

Sul singolo campione si montano i porta trasduttori e si posiziona il campione tra due supporti cilindrici, in modo che non si trovi a diretto contatto con l'attuatore durante la prova (figura 32).



Figura 32 - Campione per modulo dinamico con porta trasduttori

Dopo, si posiziona il sistema all'interno della camera climatica della UTM-30 (che si trova alla temperatura di condizionamento dei campioni) al centro della traversa e con il supporto cilindrico superiore esattamente sulla verticale dell'attuatore. Si collegano i trasduttori con l'ausilio del software per poi bloccarli per mezzo di viti, in modo da non falsare le misurazioni con i loro movimenti (figura 33).



Figura 33 - Configurazione di prova per il modulo dinamico

2. Impostazioni software

General	Setup and Control	Test Data	Tuning	Chart																											
Frequencies <input checked="" type="checkbox"/> 25 Hz <input type="checkbox"/> 20 Hz <input checked="" type="checkbox"/> 10 Hz <input checked="" type="checkbox"/> 5 Hz <input type="checkbox"/> 2 Hz <input checked="" type="checkbox"/> 1 Hz <input checked="" type="checkbox"/> 0.5 Hz <input type="checkbox"/> 0.2 Hz <input checked="" type="checkbox"/> 0.1 Hz <input type="checkbox"/> 0.01 Hz	Specimen information Identification: C1_4°C Conditioning time: 12h Properties/Comments:	Dimensions <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Point 1</th> <th>Point 2</th> <th>Point 3</th> <th>Point 4</th> <th>Point 5</th> <th>Point 6</th> <th>Average</th> <th>Std Dev.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Diameter (mm)</td> <td>94.0</td> <td>94.0</td> <td>94.0</td> <td>94.0</td> <td></td> <td></td> <td>94.00</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>Height (mm)</td> <td>130.0</td> <td>130.3</td> <td>130.1</td> <td>130.1</td> <td></td> <td></td> <td>130.14</td> <td>0.149</td> </tr> </tbody> </table> Cross-sectional area (mm ²): 6339.8		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.	Diameter (mm)	94.0	94.0	94.0	94.0			94.00	0.000	Height (mm)	130.0	130.3	130.1	130.1			130.14	0.149		
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev.																							
Diameter (mm)	94.0	94.0	94.0	94.0			94.00	0.000																							
Height (mm)	130.0	130.3	130.1	130.1			130.14	0.149																							
	SI units Target test temperature (°C): 4 Target confining stress (kPa): 0 Initial modulus (MPa): 1000 Axial gauge length (mm): 100 Loading shaft diameter (mm): 0	US customary units Target test temperature (°F): 39.2 Target confining stress (psi): 0 Initial modulus (ksi): 145.04 Axial gauge length (in): 3.94 Loading shaft diameter (in): 0	Average dynamic strain range from: 75 to 125 micro-strain Contact stress (% of dynamic stress): 5 <input type="checkbox"/> Rest period between sweeps (min): 0 <input type="checkbox"/> Apply contact stress correction																												

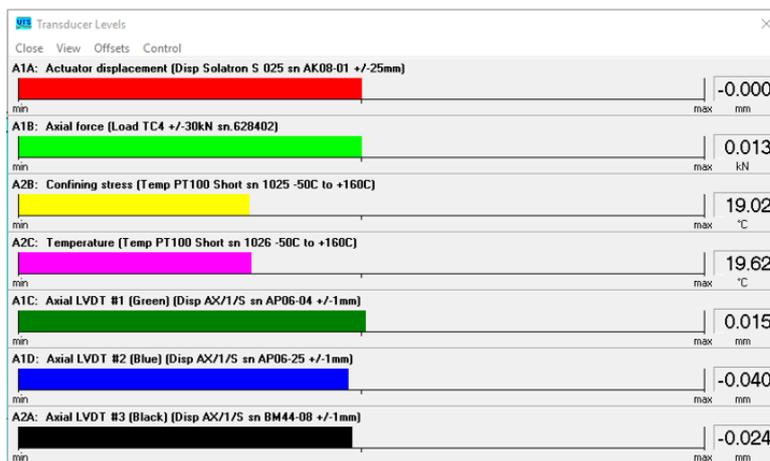


Figura 34 – In alto: impostazioni software per modulo dinamico; in basso: livelli a cui impostare trasduttori durante la prova

La figura 34 mostra alcune delle principali impostazioni da inserire all'interno del software. In generale, vanno inserite le dimensioni di ogni singolo campione in termini di altezza e diametro, ma anche la temperatura di prova e le frequenze alle quali testare il campione. Queste vengono definite da normativa e nel caso in esame sono le seguenti (figura 35):

Frequency, Hz
25
10
5
1
0.5
0.1

Figura 35 - Frequenze di prova per il modulo dinamico

3. Esecuzione della prova

A questo punto, tramite il pulsante di avviamento nel software si fa partire la prova. L'attuatore applica un carico di compressione sinusoidale a diverse frequenze (dalla più alta alla più bassa) e per ogni frequenza si hanno dieci cicli di carico. Prima dell'applicazione del carico e per ogni frequenza, la macchina effettua dieci impulsi di calibrazione, per far sì che non venga mai superata una certa soglia di deformazione compresa tra 75 e 125 micro-strain. La prova si effettua senza pressione di confinamento e non è distruttiva: infatti il carico applicato è tale per cui il campione in conglomerato bituminoso ha un comportamento visco-elastico (è possibile riutilizzarlo anche per altri test meccanici) (figura 36).

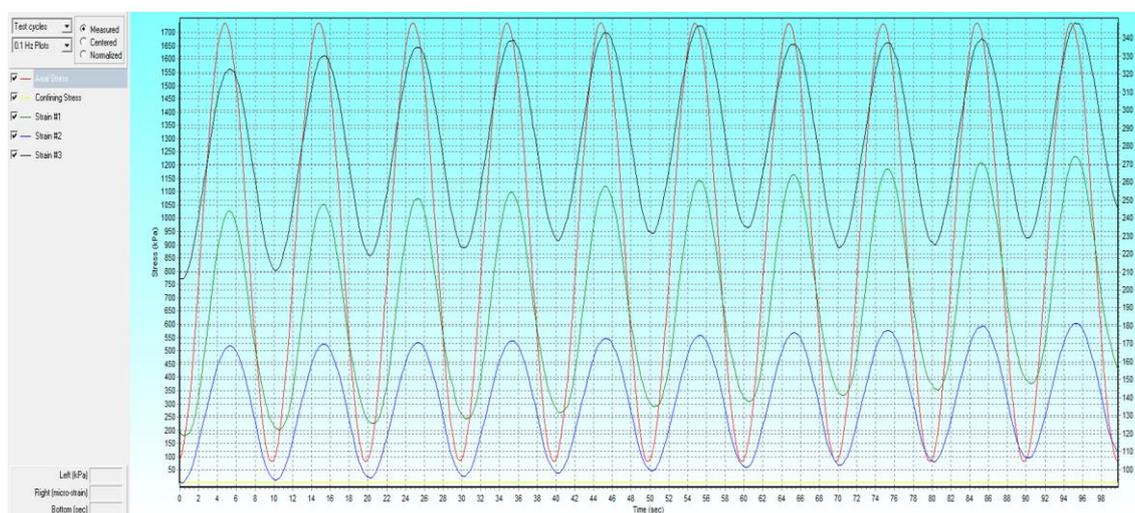


Figura 36 – Andamento della tensione (in rosso) e della deformazione associata (altri colori) misurata dai trasduttori

Nel corso della prova il software è in grado di calcolare in tempo reale il modulo dinamico e l'angolo di fase per ogni frequenza di carico. Come metodo di controllo durante la prova, si verifica che il valore di modulo decresce al diminuire della frequenza mentre la fase aumenta. Altri due controlli sono il load standard error, che non deve superare il 10%, e le curve sinusoidali generate a schermo, che devono essere continue e non frastagliate (vorrebbe dire che i trasduttori non stanno leggendo nella maniera opportuna le deformazioni in quanto montati sui supporti in maniera errata).

3.8.3 Curve maestre

Una volta ottenuti i valori di modulo dinamico alle diverse frequenze e al variare della temperatura, è opportuno rappresentarle su un grafico. Questo grafico è detto curva maestra. Per la sua costruzione si sfrutta il principio di equivalenza tempo-temperatura, che mette in relazione il tempo e la frequenza di carico con la risposta del campione. Come detto in precedenza, la rigidità del conglomerato bituminoso varia a seconda di questi parametri. In particolare, all'aumentare della temperatura e al diminuire della frequenza, il modulo diminuisce e il comportamento della miscela è di tipo viscoso, mentre al diminuire della temperatura e all'aumentare della frequenza, il modulo dinamico aumenta e il comportamento della miscela è di tipo rigido.

Le curve maestre rappresentano la risposta del materiale ad una data temperatura di riferimento. I dati necessari per la sua costruzione sono quelli che si ricavano alle diverse temperature dalla valutazione del modulo dinamico. Infatti, è possibile considerare i valori sperimentali ottenuti come tanti tratti della stessa curva, traslati per effetto della temperatura lungo l'asse che rappresenta il dominio delle frequenze (principio di equivalenza tempo-temperatura). La traslazione si effettua per mezzo di un fattore di spostamento detto shift-factor, definito come il rapporto tra le due frequenze a cui il modulo assume lo stesso valore, ma a temperature differenti. In sostanza, mediante questo parametro, è possibile traslare porzioni di curva a temperature differenti lungo l'asse delle frequenze, in modo che i valori di modulo coincidenti si trovino nella stessa posizione.

Generalmente, la temperatura di riferimento per le curve maestre è 20°C; infatti, è stata utilizzata anche nel lavoro di tesi in esame. Per la modellazione, si fa riferimento alla norma AASHTO PP 61-13, che a sua volta si riferisce alla modellazione definita nel Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Essi permettono di ricavare la curva maestra mediante un modello sigmoidale, valutando i moduli in funzione di una frequenza ridotta, definita come la frequenza riferita alla temperatura di riferimento equivalente alla effettiva frequenza di carico della prova per una certa temperatura.

Il primo parametro da determinare è lo shift-factor, che varia al variare della temperatura.

L'AASHTO PP 61-13, prevede la seguente formulazione in base logaritmica:

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

Dove:

- $a(T)$ è lo shift-factor alla temperatura T ;
- ΔE_a è l'energia di attivazione (considerata come un parametro del modello);
- T è la temperatura di prova considerata durante il test di caratterizzazione del modulo dinamico in esame;
- T_r è la temperatura di riferimento (in questo caso 20°C)

Una volta determinato ciò, allora sarà possibile identificare anche la frequenza ridotta rispetto a cui saranno riferiti i valori di modulo traslati, in base logaritmica, come la somma della frequenza alla temperatura della prova e lo shift-factor relativo (formula di Arrhenius):

$$\log f_r = \log f + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

Dove:

- f_r è la frequenza ridotta alla temperatura di riferimento;
- f è la frequenza alla temperatura di prova.

Infine, per la costruzione della curva maestra si utilizza una formulazione leggermente modificata dell'equazione definita da MEPDG, ma comunque una funzione sigmoideale:

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

Dove:

- $|E^*|$ è il modulo dinamico;
- Max è il logaritmo del valore dell'asintoto vetroso $|E^*|_{\max}$;
- γ è un parametro che rappresenta la pendenza della curva nel suo punto di flesso;
- β è un parametro che rappresenta il valore di frequenza ridotta per il punto di flesso della curva;
- δ è l'intercetta della curva con l'asse delle y.

La determinazione dei parametri del modello è avvenuta per mezzo di un'ottimizzazione numerica con l'ausilio del risolutore di excel: esso sfrutta il principio dei minimi quadrati, cioè cerca la combinazione per cui la somma dei quadrati delle differenze fra i valori del modulo dinamico da test e quelli predetti tramite la funzione sigmoideale sia minimo. In questo contesto, è stato ritenuto opportuno valutare e definire l'asintoto orizzontale superiore (che definisce il limite vetroso del conglomerato bituminoso) come un parametro del modello e quindi determinarlo per mezzo il risolutore. In alternativa, si poteva utilizzare il modello di Hirsch, che calcola il valore di $|E^*|_{\max}$ con una relazione dipendente da VMA e VFA. Infine, è possibile costruire la curva maestra (figura 37).

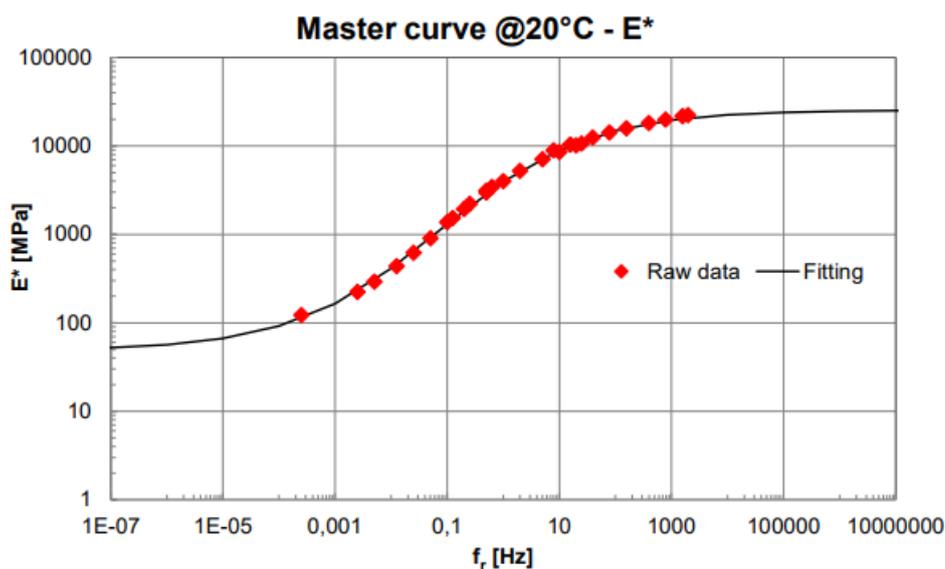


Figura 37 - Esempio di curva maestra

3.9 Flow number

Uno dei fenomeni di degrado strutturale più importante è l'ormaiamento, per cui sulla superficie della pavimentazione si formano dei solchi, che si sviluppano progressivamente, dovuti al passaggio continuo dei veicoli. I solchi si generano a causa dell'accumulo di deformazioni permanenti, essendo che il conglomerato bituminoso è un materiale a comportamento viscoelastico influenzato dalla temperatura, che in questo caso esplica il suo effetto quando raggiunge valori elevati.

Per la valutazione delle deformazioni permanenti, in questo elaborato di tesi si è fatto riferimento ad una prova di compressione ciclica monoassiale, detta flow number test, da cui si ricava un parametro detto flow number. Dalla prova, che è di tipo distruttiva perché porta a rottura il campione, si valutano le deformazioni cumulate permanenti in funzione dei cicli di carico e, allo stesso tempo, il tasso di deformazione (figura 38).

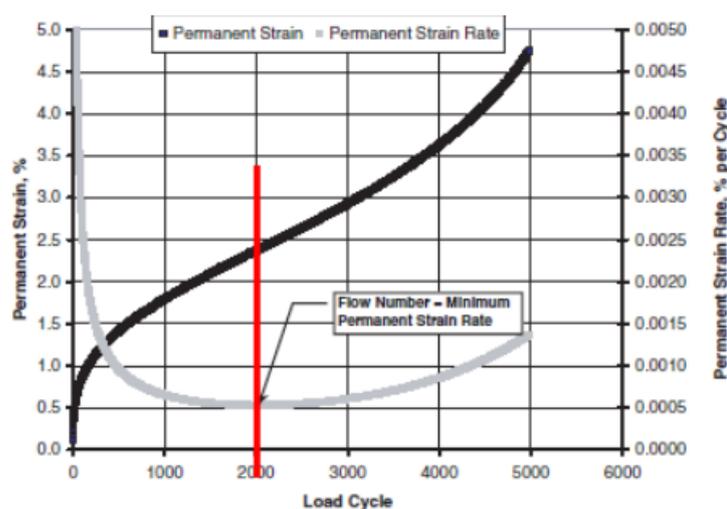


Figura 38 - Flow number

Il carico applicato è di tipo uniassiale, ripetuto in un ciclo di carico con 0,1 secondi di carico e 0,9 secondi di scarico e alla frequenza di 1 Hz. Questo permette di valutare le deformazioni permanenti cumulate e allo stesso tempo osservare a grafico i risultati. Essi mostrano un comportamento a tre regioni:

- Inizialmente si ha un tasso di deformazione che decresce molto rapidamente con il numero di cicli (regione 1);

- A questa fase ne segue una, con un numero di cicli molto variabile, in cui il tasso di deformazione resta pressoché costante (regione 2);
- L'ultima fase è quella in cui si ha una crescita nel tasso di deformazione tale per cui il materiale viene portato velocemente a rottura (regione 3).

Il flow-number è il numero di cicli che definisce la zona di transizione tra il creep secondario e il terziario ed è determinato identificando il punto di minimo del tasso di deformazione.

La prova è stata sviluppata sui campioni utilizzati per la determinazione del modulo dinamico e delle curve maestre, con l'unica accortezza di rimuovere i dadi porta trasduttori che gli erano stati montati. Anche in questo caso è stata utilizzata UTM-30, ma in modalità flow-number test. Essa è stata svolta per mezzo dei seguenti step:

1. Preparazione dei campioni

In questa prova la configurazione del campione è molto semplice perché è sufficiente posizionarlo al centro dei piatti superiore e inferiore di contenimento, previa separazione tramite dischi in lattice. Dopo, lo si posiziona al centro della traversa all'interno della UTM-30, in modo che l'attuatore si trovi al centro del piatto superiore (figura 39). Il campione e la cella sono stati condizionati alla temperatura di 55°C rispettivamente per 12 ore e 3 ore.



Figura 39 - Campione nella configurazione di prova all'interno della UTM-30

2. Settaggio dei parametri

La prova viene condotta con l'ausilio di un software all'interno del quale è necessario settare una serie di parametri definiti dalla normativa AASHTO T 378-17:

- Dimensione del campione in termini di altezza e diametro in quattro punti;
- Temperatura di prova pari a 55°C;
- Intensità dello sforzo assiale ripetuto di 600 kPa;
- Sforzo di contatto pari al 5% dello sforzo assiale pari a 30 kPa;
- Deformazione assiale permanente massima consentita di 100000 microstrain;
- Numero di cicli di carico massimo consentito pari a 10000.

3. Esecuzione della prova

Una volta settati tutti i parametri, la prova viene avviata. La prova è di tipo distruttivo e per questo motivo, una volta terminata si noterà una diminuzione in altezza con leggero spanciamento laterale. Se il campione non si abbassa in altezza ma si spancia solamente, allora la rottura non è avvenuta a causa delle deformazioni permanenti (figura 40).



Figura 40 - A sinistra campione non soggetto al test del flow number, a destra deformazione post test

Il valore di flow number è possibile definirlo a partire dall'incremento di deformazione permanente per mezzo nel modello di Francken, definito dall'accoppiamento di una legge di potenza con una funzione esponenziale:

$$\varepsilon_p = A \cdot n^B + C \cdot (e^{D \cdot n} - 1)$$

Dove:

- ε_p è la deformazione assiale permanente;
- n è il numero di cicli di carico;
- A, B, C, D dei parametri di controllo.

Il flow number viene calcolato imponendo l'annullamento della derivata seconda al modello di Francken, previa determinazione dei parametri di controllo attraverso un processo di ottimizzazione numerica.

4 Analisi dei dati

In questo capitolo verranno mostrati e analizzati i risultati delle prove effettuate sulle diverse miscele. Si ricorda che l'obiettivo è di verificare la costanza di prestazione nelle diverse fasi della progettazione per le diverse miscele esaminate, nei due differenti impianti. L'analisi sarà condotta a livello di requisiti di Capitolato Speciale d'Appalto, per verificare che vengano rispettati, e a livello di confronto nelle diverse fasi della progettazione e per i diversi impianti.

Il capitolo in esame si suddividerà in due parti: analisi delle caratteristiche compositive e volumetriche, effettuata su tutte e 16 le miscele bituminose, e analisi delle caratteristiche meccaniche, effettuata su 7 miscele bituminose riguardanti gli strati di usura e collegamento.

In questo contesto, verranno presentate una serie di tabelle riassuntive, all'interno delle quali si utilizzerà la nomenclatura definita in tabella 1. Per ulteriori dettagli, si può far riferimento agli allegati.

4.1 Analisi delle caratteristiche compositive e volumetriche

L'analisi che segue è fondamentale per la verifica della costanza della prestazione richiesta dal Regolamento prodotti da costruzione CPR 305/11 e per la definizione delle caratteristiche essenziali delle miscele prodotte, su cui poi eventualmente apporre la marcatura CE.

Di seguito verranno analizzate tutte le caratteristiche compositive e volumetriche fondamentali per tale verifica.

4.1.1 Contenuto di bitume

Come definito al capitolo precedente, il contenuto di bitume è stato determinato su tutte le miscele sfuse tramite ignizione. Di seguito si riportano e commentano le tabelle riassuntive con i risultati in termini di percentuale di bitume rispetto alla miscela e rispetto al peso degli aggregati.

Tabella 2 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di usura in prequalifica

USURA - PREQUALIFICA				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
1	A _P	5,56%	5,91%	5,00-6,50
	B _P	5,78%	6,17%	
2	G	5,50%	5,84%	
	H _P	5,60%	5,96%	

Tabella 3 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di usura in prova di produzione

USURA - PROVA DI PRODUZIONE				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
1	A _C	5,38%	5,71%	5,00-6,50
2	H _C	5,68%	6,05%	

Tabella 4 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di usura per la stesa

USURA - STESA				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
2	H _S	5,81%	6,20%	5,00-6,50

Le tabelle 2-4 si riferiscono al contenuto di bitume all'interno delle miscele per strato di usura dei diversi impianti. Innanzi tutto, come si nota, tutti i contenuti di bitume rispettano i limiti imposti da capitolato.

Per quanto riguarda l'impianto 1, di cui sono state realizzate le miscele solo in fase di prequalifica e prova di produzione, vi è una variazione tra le due fasi del 3,4% nel caso della miscela A_P e del 7,5% nel caso della miscela B_P. Considerando la variabilità della prova, nella quale il contenuto di bitume può non essere stato eliminato del tutto, la variazione tra la miscela A_P e la A_C è del tutto insignificante. Per quanto riguarda il

confronto tra la miscela B_P e la A_C, invece, il 7,5% di variazione, che corrisponde a circa lo 0,40% di differenza in contenuto di bitume, è imputabile al fatto che qui è stato aumentato il contenuto di polimero all'interno del mix. Il polimero ha lo scopo di aumentare le caratteristiche meccaniche della miscela in termini di rigidità, resistenza a fatica e proprietà meccaniche in generale, per cui da progetto è stato scelto di aumentare il contenuto di bitume, portando anche un aumento di polimero. Nella realtà questo tipo di confronto non ha alcun senso, essendo la miscela A_C la prova di produzione della miscela A_P.

Considerando l'impianto 2, si noti come la variazione di contenuto di bitume tra le miscele in prequalifica e in prova di produzione è del tutto irrilevante. Se considerassimo solo la miscela stesa, alla quale è stato aggiunto l'additivo antighiaccio, anche in questo caso la variazione è minima (addirittura del 2,4% tra la prova di produzione e la stesa).

Si può concludere che, al livello di singolo impianto per quanto riguarda la costanza di prestazione, si ha la continuità in contenuto di bitume.

Per quanto riguarda il confronto tra i due impianti, si nota che il contenuto di bitume in fase di prequalifica delle miscele A_P e H_P (le miscele di cui è stata eseguita la prova di produzione) si considera del tutto analogo (valori quasi sovrapponibili) ma, analizzando la fase di prova di produzione vi è una differenza in contenuto di bitume dello 0,50% circa, cioè una variabilità del 7,9%, discretamente elevata. Questo può essere dovuto a diverse cause:

- Il numero di prove in laboratorio effettuate non è stato sufficiente per definire un valore di riferimento opportuno, per cui la variabilità del test è elevata;
- Piccole variazioni di bitume all'interno del singolo impianto hanno portato ad una grande variazione tra i due.

Tabella 5 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di collegamento in prequalifica

COLLEGAMENTO - PREQUALIFICA				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
1	C _P	5,07%	5,37%	4,50-5,50
	D _P	5,07%	5,30%	
2	I _P	4,57%	4,80%	

Tabella 6 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di collegamento in prova di produzione

COLLEGAMENTO - PROVA DI PRODUZIONE				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
1	C _C	5,02%	5,31%	4,50-5,50
2	I _C	4,27%	4,47%	

Dalle tabelle 5 e 6 si evince, innanzi tutto, che sono stati rispettati i limiti imposti dal Capitolato per quanto riguarda il contenuto di bitume.

Analizzando in particolare i singoli impianti si nota che, nel caso dell'impianto 1, la continuità in percentuale di bitume è confermata, essendoci una lievissima variazione del tutto insignificante. Per quanto concerne l'impianto 2, la differenza è più marcata (circa il 6,9%) ma rientra nei limiti predisposti.

Ricercando la continuità di prestazione anche a livello dei due impianti, determinarla è del tutto impossibile. Infatti, essi hanno optato per mix design differenti con contenuti di bitume del tutto differenti e variazioni del 15,8%, cioè una differenza in bitume dello 0,84%.

Tabella 7 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di collegamento in prequalifica

BASE - PREQUALIFICA				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
1	E _P	4,95%	5,23%	5,00-6,00
	F _P	3,86%	4,02%	
2	J _P	4,13%	4,32%	

Tabella 8 - Contenuto di bitume per le miscele dello strato di collegamento in prova di produzione

BASE - PROVA DI PRODUZIONE				
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}	LIMITI CAPITOLATO [%B _{AGG}]
1	F _C	4,14%	4,33%	5,00-6,00

Dalle tabelle 7 e 8 si nota immediatamente che non sono stati rispettati i limiti imposti da Capitolato. In questi termini non è nemmeno possibile parlare di pavimentazione perpetua essendo mancante uno dei requisiti fondamentali. Il contenuto di bitume incide in maniera decisa sulle caratteristiche dello strato di base, in quanto ne conferisce un aumento significativo della resistenza a fatica. La realizzazione in impianto di strati di base del tipo rich-bottom base è molto complessa.

4.1.2 Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è stata effettuata sugli aggregati lavati e asciugati a 105°C provenienti dalla prova di ignizione. Le prove sono state effettuate tenendo conto dei limiti imposti da Capitolato, in termini di fuso granulometrico e setacci utilizzati.

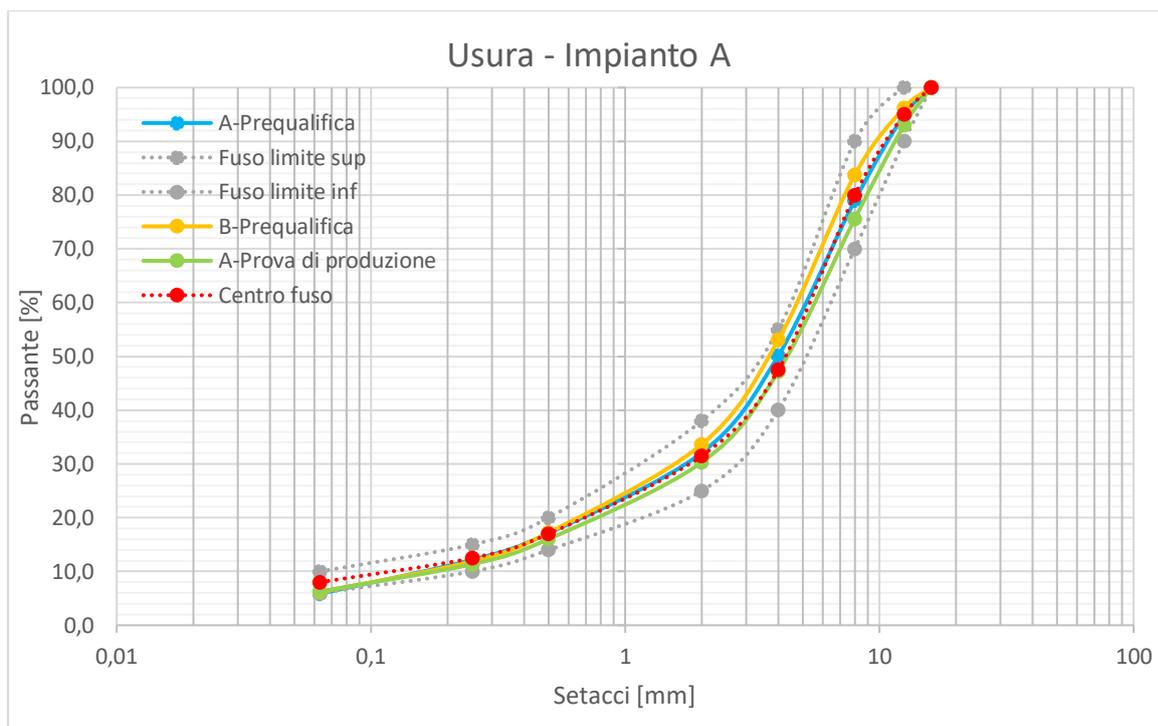


Grafico 1 - Usura: curve granulometriche nelle diverse fasi della progettazione dell'impianto 1

La rappresentazione dello scheletro litico avviene su un piano semi-logaritmico: sull'asse delle ascisse sono rappresentate le aperture dei setacci in mm, sull'asse delle ordinate il passante progressivo percentuale. Osservando le curve del grafico 1, si può notare subito come tutte si trovino all'interno del fuso definito da Capitolato. In particolare, si noti come non si discostino in maniera eccessiva dal centro fuso, tranne che per il contenuto di filler minerale, che è il minimo necessario da utilizzare, essendo a livello del limite inferiore. Analizzando poi dal punto di vista della continuità, si può notare come effettivamente essa sia mantenuta. Infatti, la miscela in prequalifica A_p , che corrisponde alla miscela in prova di produzione A_c , si attestano entrambe nell'intorno del fuso granulometrico, con uno scostamento massimo l'una dall'altra del 7%, in corrispondenza proprio del contenuto di filler. Per quanto riguarda B_p , lo scostamento è maggiore, anche in virtù di una scelta differente in fase di mix design.

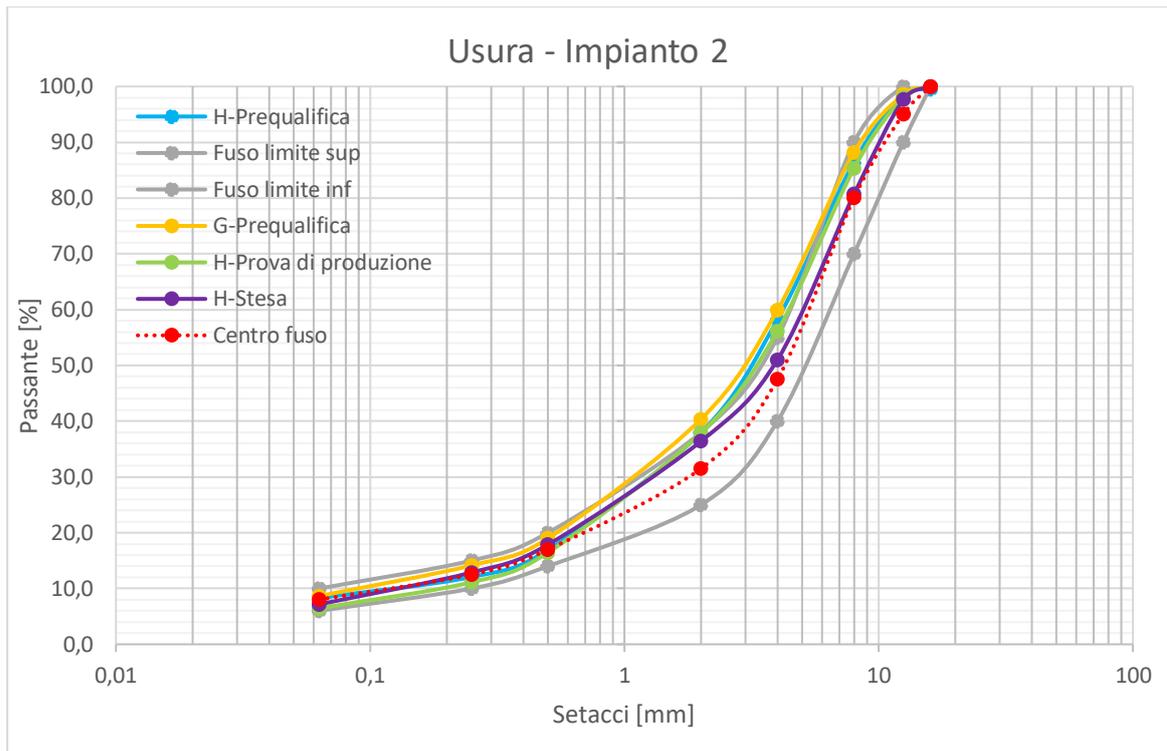


Grafico 2– Usura: curve granulometriche nelle diverse fasi della progettazione dell'impianto 2

Osservando il grafico 2, si noti come anche in questo caso tutte le curve sono all'interno del fuso a meno della miscela G di prequalifica, della quale non è stata eseguita la prova di produzione. A differenza di quanto visto nell'impianto 1, considerando gli aggregati trattenuti fino allo 0,50 mm, sono tutte spostate verso l'alto rispetto al centro fuso. Questo sta ad indicare che per ogni setaccio la percentuale di passante ai diversi vagli era molto alta, di conseguenza si ha una curva granulometrica di composizione più fine rispetto a quanto visto nel grafico 1. Analizzando poi a livello di continuità granulometrica, si può affermare che essa è costante fino alla prova di produzione, per poi scostarsi in maniera eccessiva nella fase di stesa.

Per ultimo si mettono a confronto le curve granulometriche dei due impianti per la fase di prova di produzione (grafico 3):

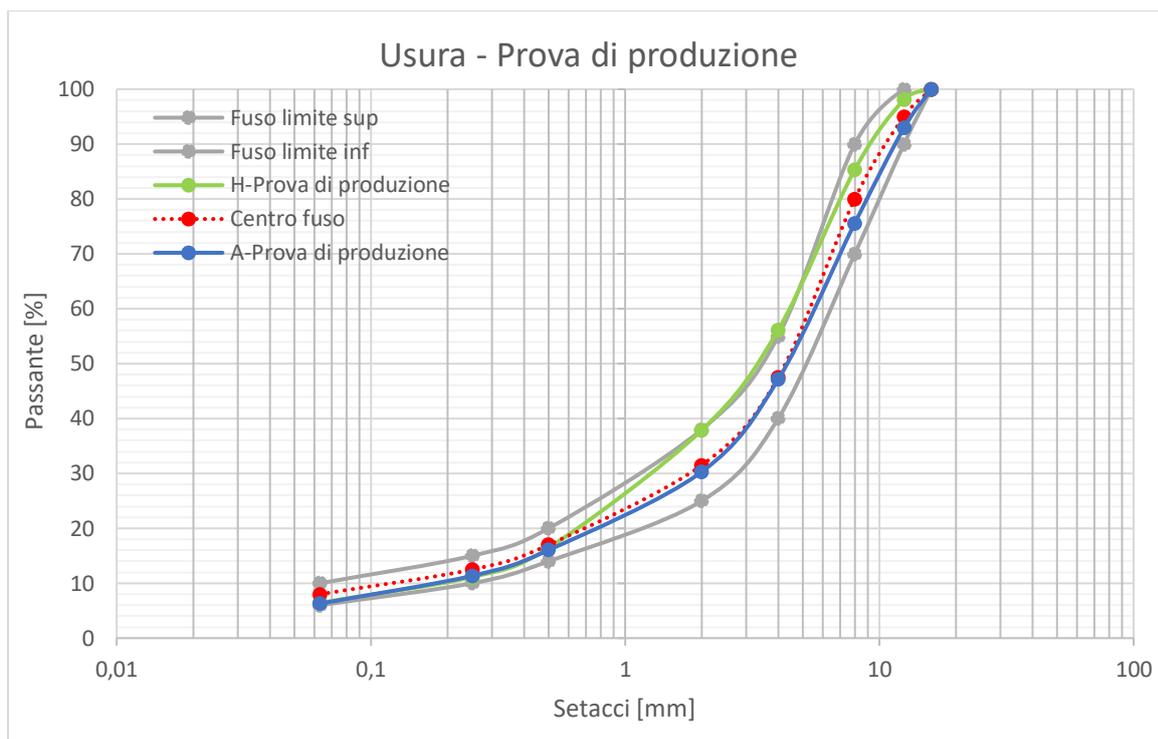


Grafico 3 - Usura: curve granulometriche nei due impianti in prova di produzione

Si nota immediatamente che non è possibile comparare le due curve, essendo totalmente diverse a meno delle classi granulometriche passanti al setaccio di 0,50 mm. Probabilmente in fase di mix design sono state definite curve differenti in relazione alle altre caratteristiche compositive e volumetriche.

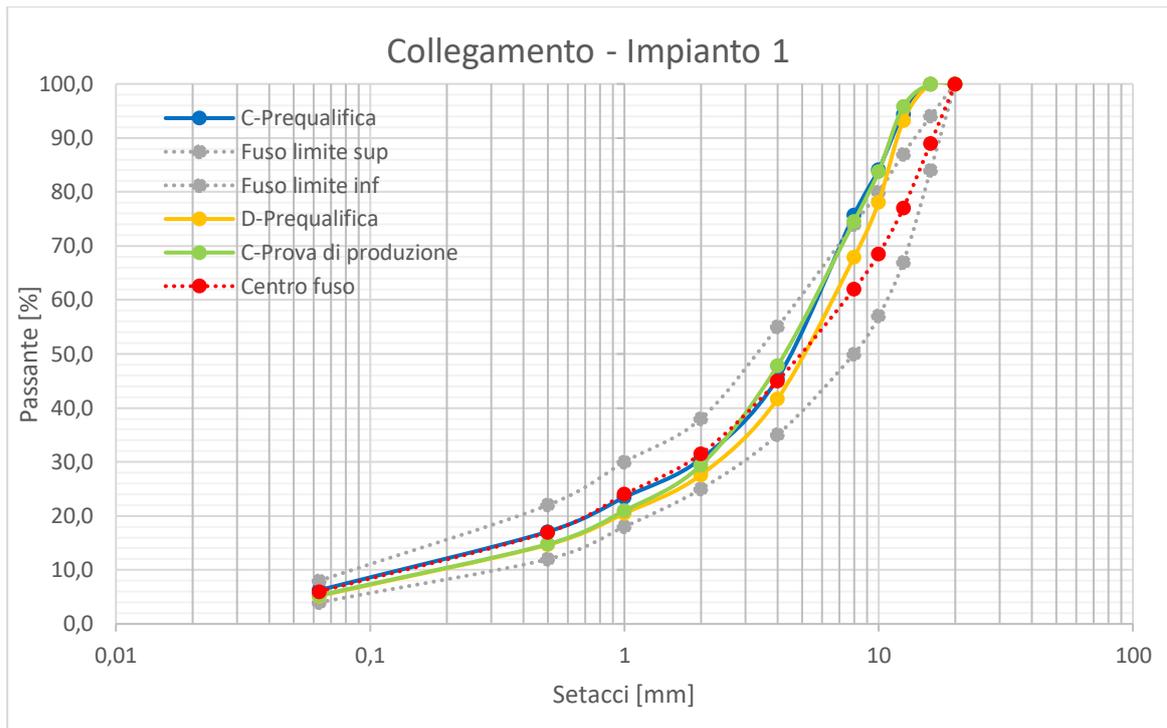


Grafico 4 - Collegamento: curve granulometriche nelle diverse fasi della progettazione dell'impianto 1

Come si nota dal grafico 4, nessuna miscela ha uno scheletro litico idoneo alle richieste di Capitolato. Infatti, il passante fino ai 10 mm supera sempre il limite superiore del fuso, stando a significare che sono presenti aggregati di dimensioni grossolane in quantità insufficienti. Questo può portare a carenze nelle caratteristiche meccaniche e volumetriche per le richieste di Capitolato. La miscela con la classe granulometrica migliore sembra essere la C_P , in quanto dal passante al setaccio di 8 mm in poi coincide quasi perfettamente con il centro fuso. In ogni caso, analizzando la continuità nelle diverse fasi di progettazione, si nota come la miscela C_C coincida quasi perfettamente con la miscela D_P alle classi granulometriche fino a 2 mm, per poi coincidere con la miscela C_P per le classi granulometriche più grossolane (di cui è la fase di prova di produzione successiva).

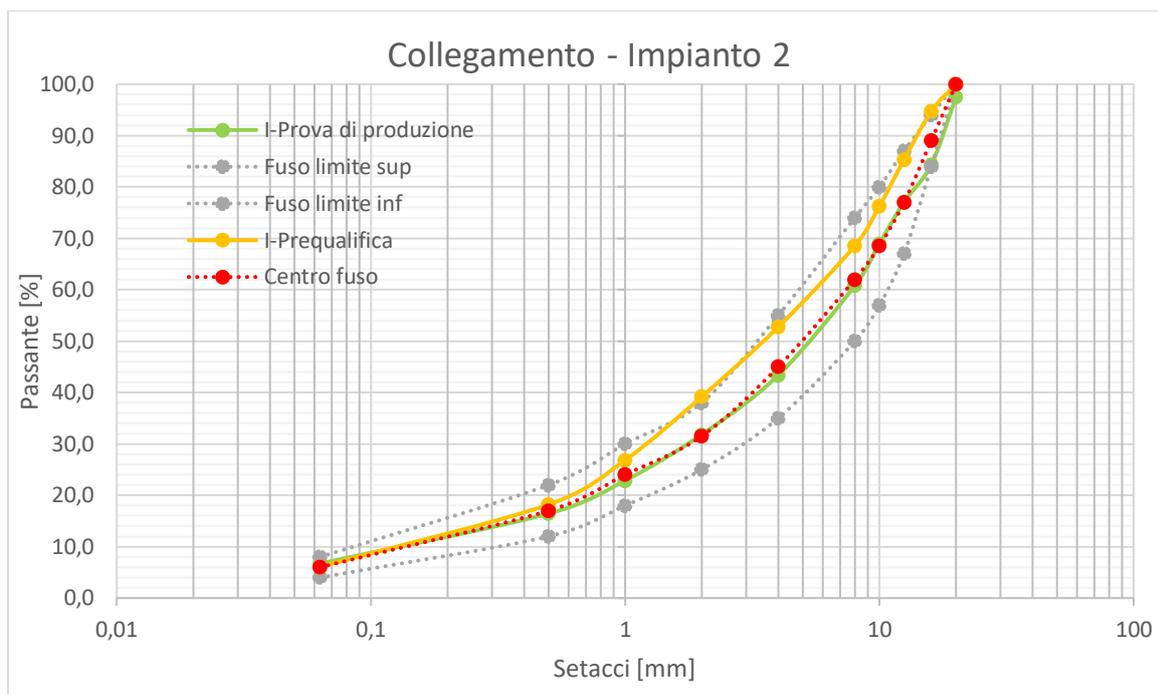


Grafico 5- Collegamento: curve granulometriche nelle diverse fasi della progettazione dell'impianto 2

Analizzando la situazione granulometrica delle miscele provenienti dall'impianto 2 (grafico 5), si può affermare che rispettano il fuso imposto dal Capitolato Speciale d'Appalto. In particolare, la miscela in prova di produzione I_C coincide con il centro fuso, a meno del passante a 20 mm e 16 mm, in cui si nota una carenza a livello di aggregato grossolano. Nel confronto della continuità di prestazione, vi sono ampie discrepanze con la miscela I_P prodotta in prequalifica. Si può però affermare che la variazione è dovuta ad un miglioramento a livello granulometrico.

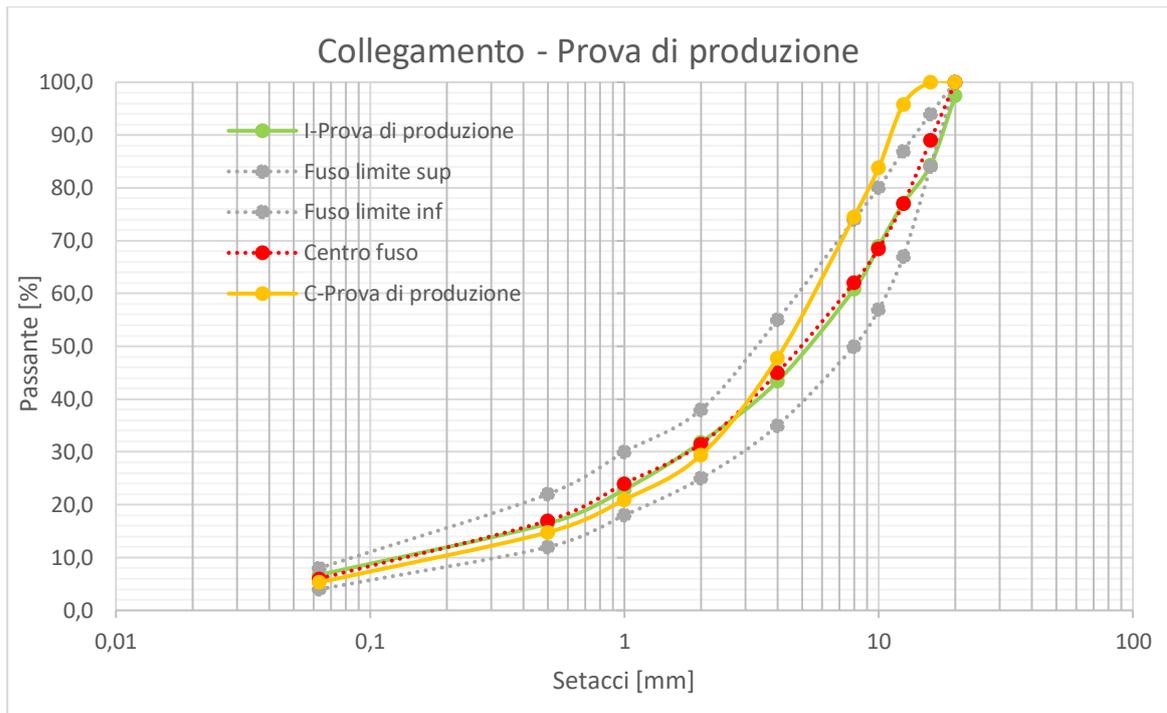


Grafico 6 - Collegamento: curve granulometriche nei due impianti in prova di produzione

Nel grafico 6 si confrontano le curve granulometriche in fase di produzione provenienti dai due impianti. La grande discrepanza presente nella selezione del quantitativo di aggregato grossolano porta con molta probabilità ad avere caratteristiche volumetriche e meccaniche differenti.

Il lavoro di setacciatura termina con la valutazione delle curve granulometriche per gli strati di base.

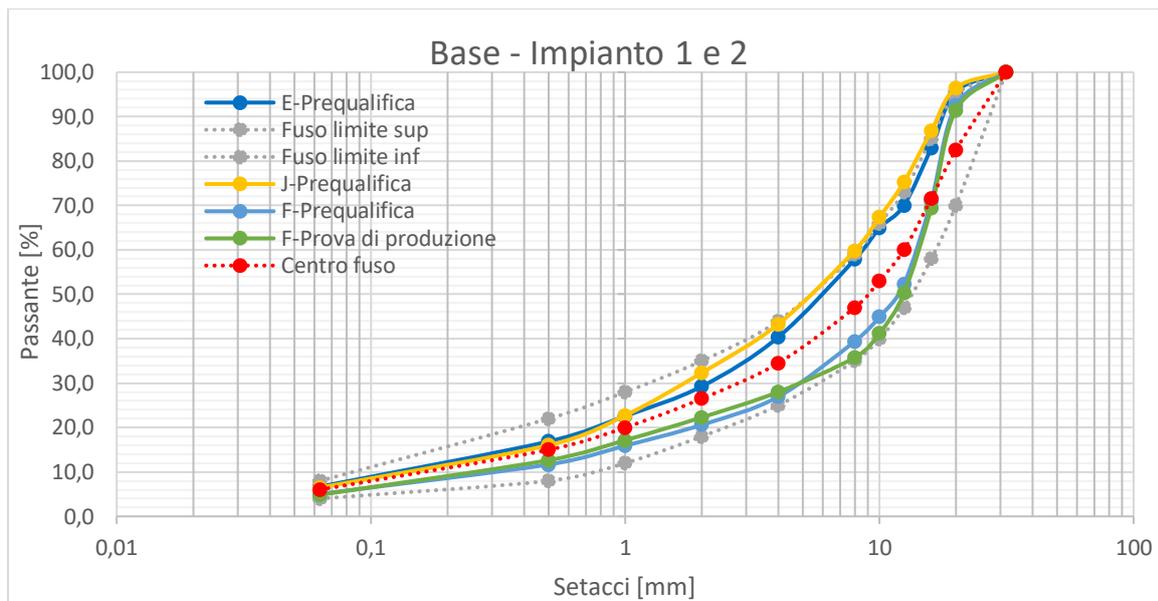


Grafico 7 - Base: curve granulometriche nelle diverse fasi della progettazione dell'impianto 1 e B

In questo caso, essendoci solo una miscela in prequalifica per quanto riguarda l'impianto 2, si è optato per confrontarla direttamente nello stesso grafico delle miscele dell'impianto 1. Sebbene tutte le curve granulometriche rientrino nei fusi, ci sono diverse differenze.

Analizzando le miscele E_P e F_P in prequalifica provenienti dall'impianto 1, esse hanno una distribuzione granulometrica completamente opposta: la prima ha troppo passante per gli aggregati grossolani, mentre la seconda ha un quantitativo troppo basso. La risposta volumetrica e meccanica potrebbe risultare del tutto diversa. È opportuno affermare che la miscela F_P è stata quella poi realizzata in fase di prova di produzione, per cui la continuità di prestazione è stata mantenuta.

La verifica della continuità a livello dei singoli impianti è possibile farla solo a livello di prequalifica. In questo caso la miscela J_P ha una distribuzione granulometrica molto simile alla E_P , ma questa non è stata presa in considerazione durante la fase di prova di produzione.

4.1.3 Analisi volumetrica con MMVT

Tra i termini di paragone per le diverse miscele, si è tenuto conto anche della massima massa volumica teorica. Si ricorda che non si tratta di un parametro reale, ma di un valore utilizzato per la successiva caratterizzazione volumetrica, essendo necessario per la definizione della massa da inserire all'interno delle fustelle per la compattazione con pressa giratoria.

In questo contesto, non si analizza il ruolo che riveste da un punto di vista fisico, in quanto le variazioni in composizione granulometrica e in percentuale di bitume delle diverse miscele sono decisamente importanti. Infatti, essendo MMVT definito come il valore di densità che si avrebbe in assenza di vuoti, sarebbe importante che almeno lo scheletro litico fosse paragonabile. In linea generale, si osserva un aumento del valore di MMVT con il diminuire del contenuto di bitume.

Siccome questo non è del tutto possibile, ci si limita a verificare la continuità di prestazione.

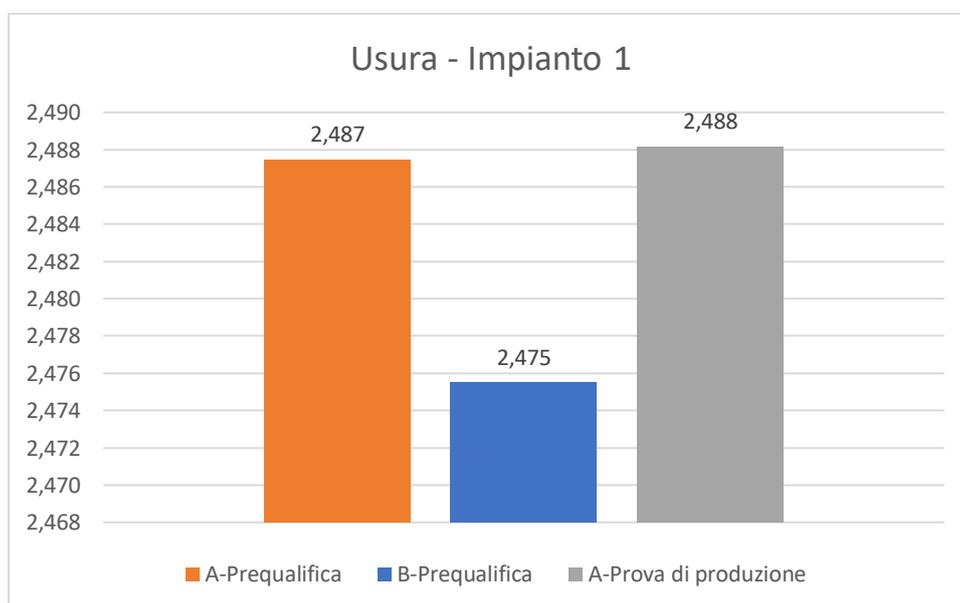


Grafico 8– MMVT delle miscele prodotte in impianto 1 nelle diverse fasi di progettazione

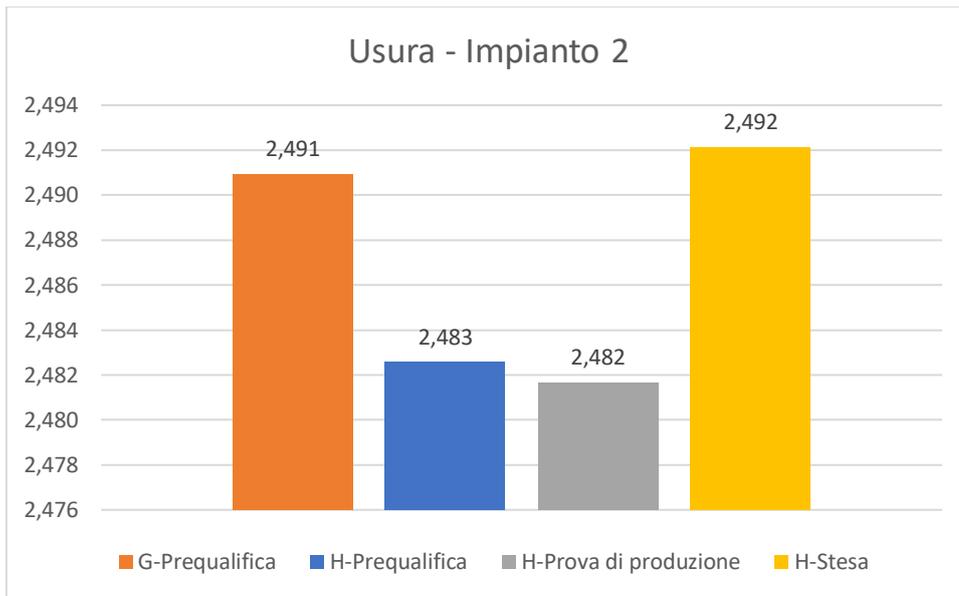


Grafico 9 - MMVT delle miscele prodotte in impianto 1 nelle diverse fasi di progettazione

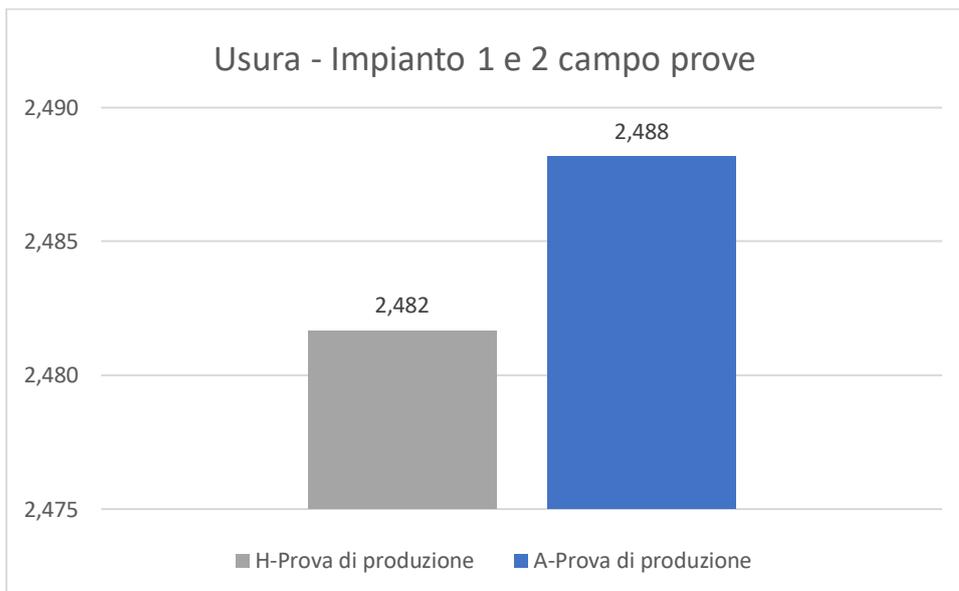


Grafico 10 – Confronto della MMVT tra impianti per le miscele prodotte in fase di prova di produzione

Nei grafici 8-10 vengono mostrati attraverso degli istogrammi le variazioni di MMVT per lo strato di usura nei diversi impianti e nelle diverse fasi della progettazione. Sull'asse delle ascisse sono rappresentate le miscele esaminate, mentre sull'asse delle ordinate il valore di massima massa volumica espressa in Mg/m^3 .

L'impianto 1 mostra una certa continuità, essendo la miscela A_C la prova di produzione della miscela A_P. Non si può esattamente dire lo stesso per quanto riguarda l'impianto 2, in cui vi è la continuità di prestazione nelle fasi di prequalifica e campo prove ma inaspettatamente nella fase di stesa non è stata mantenuta. Questo è sicuramente dovuto allo scheletro litico della miscela H_S, più corretto essendo nei dintorni del centro fuso. Infatti, come è stato appurato, il contenuto di bitume non varia in maniera tale da influire sulle caratteristiche della miscela. Si verificherà con alcune prove meccaniche se questa variazione è tale per cui la costanza della prestazione non è mantenuta.

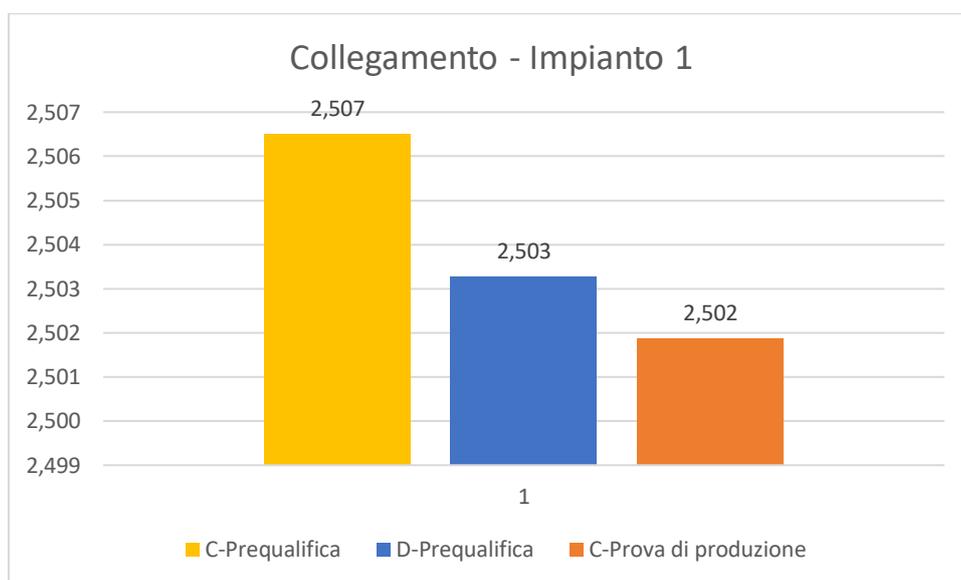


Grafico 11 - MMVT delle miscele prodotte in impianto 1 nelle diverse fasi di progettazione

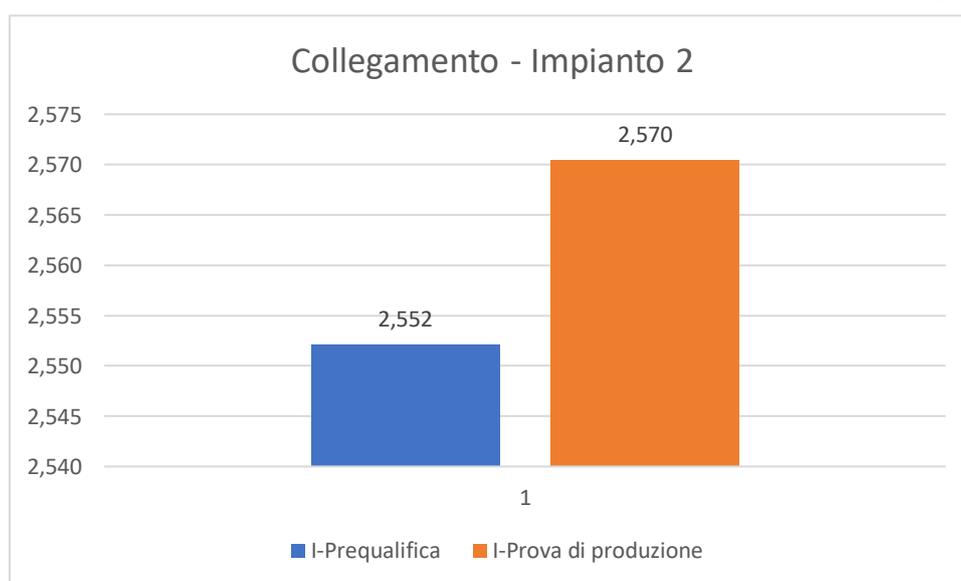


Grafico 12 - MMVT delle miscele prodotte in impianto 2 nelle diverse fasi di progettazione

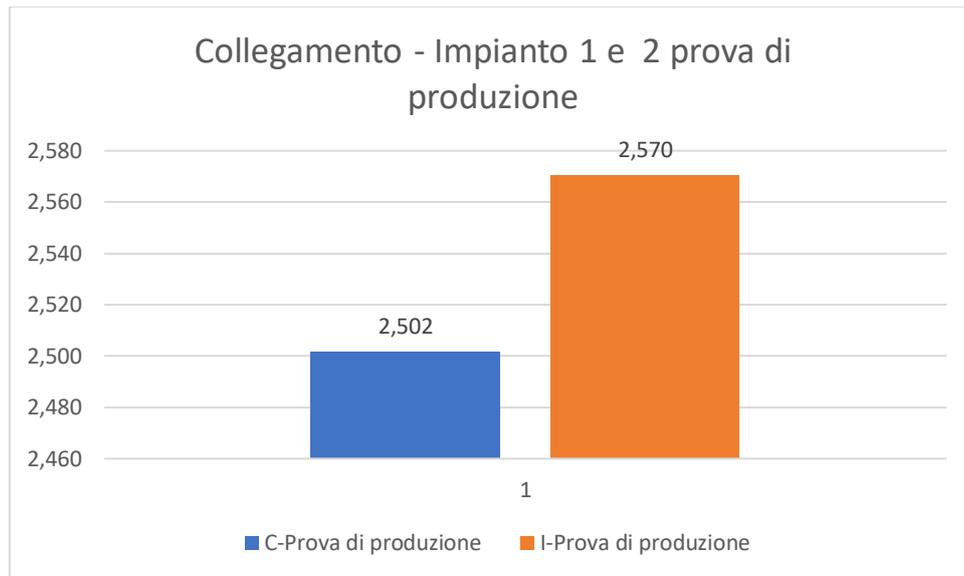


Grafico 13 - Confronto della MMVT tra impianti per le miscele prodotte in fase di prova di produzione

Osservando i dati dei grafici 11-13, si può notare immediatamente come per l'impianto 1 la costanza in termini massima massa volumica teorica è del tutto mantenuta, per tutte le miscele in esame (C_p , D_p , C_c). Non si può dire la stessa cosa per quando riguarda le miscele in impianto 2. Anche in questo caso l'elemento modificante è lo scheletro litico, che nella miscela prodotta per il campo prove segue in maniera più rigorosa il centro fuso.

Il confronto tra impianti non porta a nulla, in questo caso la costanza di prestazione non è mantenuta.

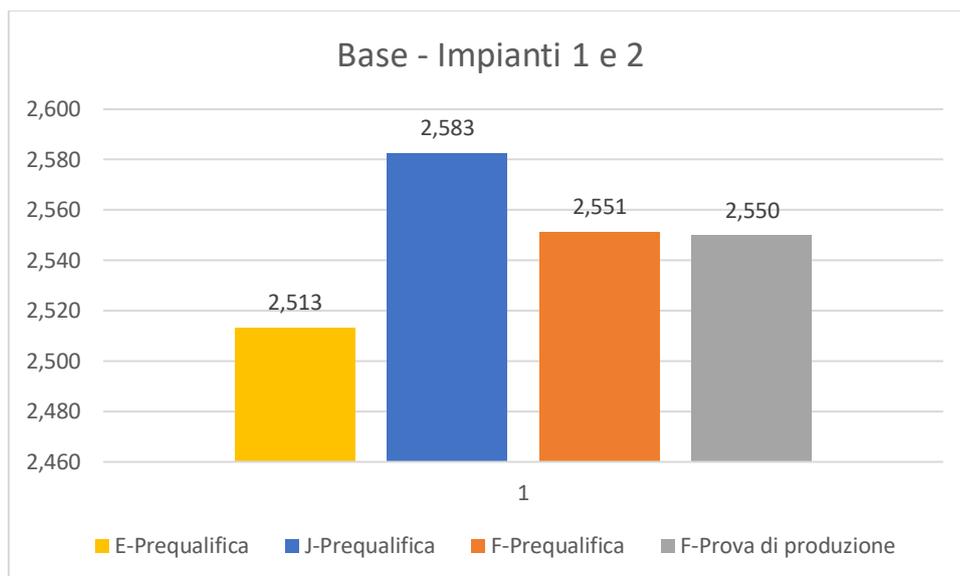


Grafico 14– Confronto MMVT tra miscele prodotte in impianti 1 e 2

Il grafico 14 riassume tutte le miscele per strato di base derivanti dai due impianti. Essa conferma quanto visto finora in termini di contenuto di bitume e scheletro litico: la costanza di prestazione è mantenuta per l'impianto 1, ma non tra i due impianti.

4.1.4 Compattazione con pressa a taglio giratorio

La compattazione con pressa a taglio giratoria è una specifica richiesta del Capitolato Speciale d'Appalto. Infatti, è richiesto che vengano realizzati campioni alla temperatura di compattazione pari a 160°C. Nel corso del lavoro di tesi, sono stati realizzati per ogni miscela esaminata tre campioni di diametro 100 mm compattati a numero di giri pari a 180. Da questi sono state ottenute le curve di compattazione, utili per valutare la lavorabilità e la capacità di addensamento delle miscele, e sono state determinate le percentuali di vuoti a 10, 100 e 180 giri, da confrontare poi con i limiti imposti da Capitolato. I vuoti a 180 giri sono stati ricavati dalla relazione che lega la massa volumica reale con la MMVT, mentre i vuoti a 10 e 100 giri direttamente dai dati di altezza registrati dalla pressa giratoria.

Di seguito si riportano i grafici che riassumono i dati ottenuti.

La prima analisi viene effettuata sullo strato di usura, riportando le medie relative ai tre campioni.

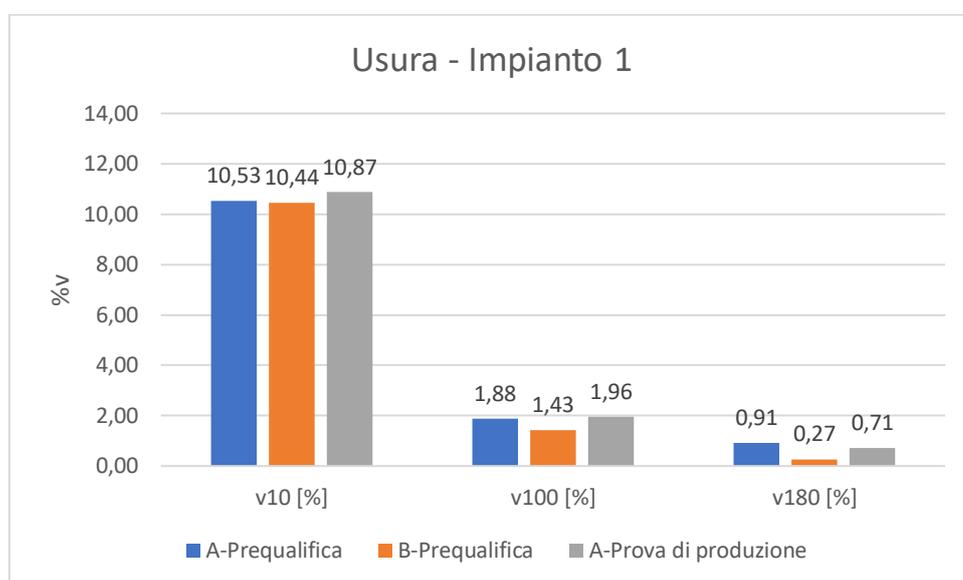


Grafico 15 – %v a 10, 100 e 180 giri per le miscele provenienti da 1

Il grafico 15 mostra degli istogrammi nei quali sono riassunti i valori di percentuale di vuoti per le diverse miscele dell'impianto 1. Sull'asse delle ascisse sono rappresentate le diverse miscele esaminate, raggruppate per classificazione sulla base del numero di giri di compattazione alla pressa giratoria, mentre sull'asse delle ordinate vi sono i valori percentuali di vuoti. Si può notare una buona continuità di prestazione a livello volumetrico, confermando quanto visto in termini di contenuto di bitume e continuità a livello granulometrico.

Il problema è legato alle prescrizioni di Capitolato. Infatti, tranne che per i vuoti a 10 giri in cui la percentuale di vuoti deve essere compresa tra il 10% e il 14%, i limiti imposti non vengono mai rispettati. A 100 giri la miscela è troppo compattata (limite 3-6%), così come a 180 giri (percentuale di vuoti almeno del 2%). Questo è dovuto alle caratteristiche compositive delle miscele: nonostante vengano rispettati i requisiti a livello di contenuto di bitume e curve granulometriche, evidentemente il mix design nel suo complesso non è idoneo. Durante il lavoro di tesi si è provato a confezionare provini ad una temperatura minore pari a 150°C, senza ottenere risultati soddisfacenti.

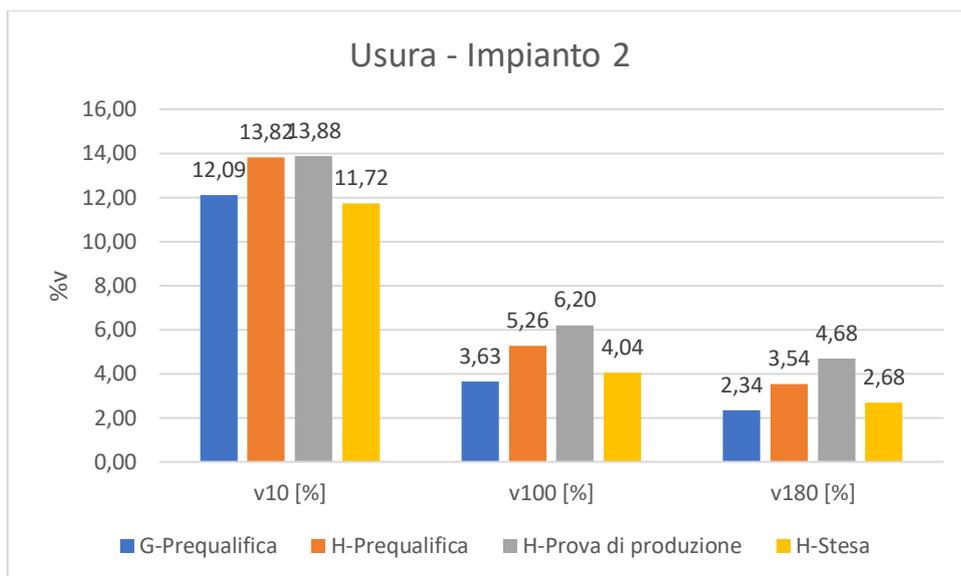


Grafico 16 - %v a 10, 100 e 180 giri per le miscele provenienti da 2

Analizzando il grafico 16 inerente alle miscele prodotte dall'impianto 2 per le diverse fasi della progettazione, si nota immediatamente come i contenuti di vuoti siano del tutto variabili a parità di numero di giri. Questo era preventivabile essendo che, nonostante il contenuto di bitume sia pressoché costante, le curve granulometriche mostrano una variabilità importante. Se in un certo senso si può notare una continuità di prestazione tra la miscela in prequalifica H_p e in prova di produzione H_c , non si può dire lo stesso per quanto riguarda la miscela H_s stesa.

Si noti che i requisiti di capitolato vengono rispettati in pieno. La differenza principale tra le miscele prodotte in impianto 2 rispetto a quelle prodotte in impianto 1 è proprio nella distribuzione granulometrica: paradossalmente, spostandosi verso il limite superiore del fuso granulometrico imposto dal Capitolato, il contenuto di vuoti a 100 e 180 giri aumentano.

La ricerca della continuità di prestazione tra impianti in questo caso è del tutto impossibile, come mostrano le tabelle sovrastanti.

I valori volumetrici analizzati sono confermati dai parametri ottenibili dalla compattazione k , c_1 , e C_{180} che sono, rispettivamente, il parametro di lavorabilità (la pendenza della retta di lavorabilità), l'autoaddensamento (l'addensamento registrato al primo giro di

compattazione) e l'addensamento a 180 giri (in allegato i valori riassuntivi). In particolare, osservando quest'ultimi, si può osservare come l'addensamento per le miscele dell'impianto 1 si avvicini al 100% (allegato A).

Come per lo strato di usura, di seguito si riportano i risultati volumetrici per lo strato di collegamento.

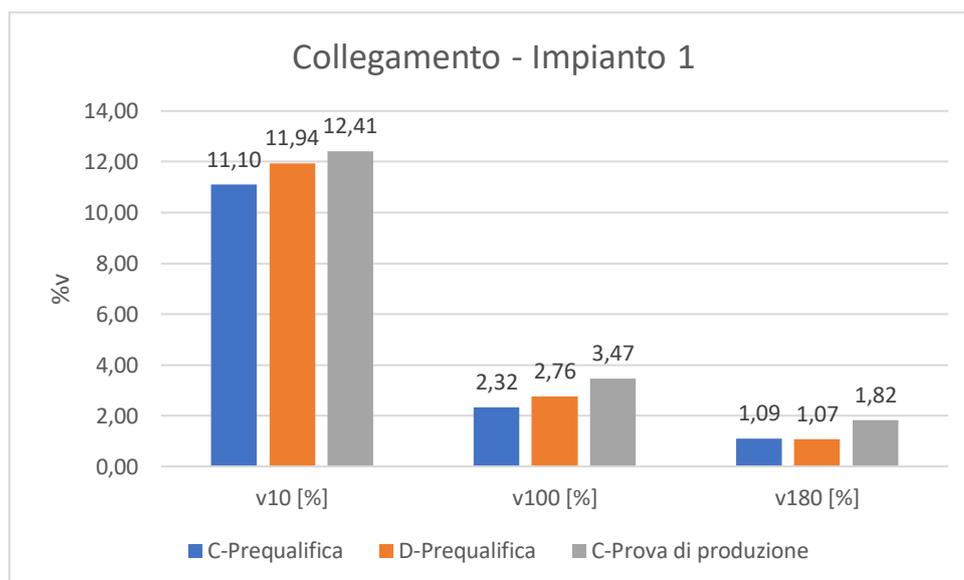


Grafico 17 - %v a 10, 100 e 180 giri per le miscele provenienti da 1

Nel grafico 17 sono mostrati i contenuti di vuoti per le diverse miscele provenienti dall'impianto 1. In questo caso, si notano alcune differenze a livello volumetrico, in particolare tra le miscele C_P e D_P in prequalifica con la C_C del campo prove. Se il contenuto di bitume è risultato costante, quello che varia è la distribuzione granulometrica. Infatti, lo scheletro litico della miscela C_C è un ibrido tra la miscela C_P e D_P .

Probabilmente lo studio granulometrico come fatto in fase di prova di produzione ha portato ad un miglioramento delle caratteristiche volumetriche: i limiti imposti dal Capitolato vengono rispettati quasi del tutto. Il contenuto di vuoti a 10 giri deve essere compreso tra il 10% e il 14%, quello a 100 giri deve essere compreso tra il 3% e il 6%, mentre quello a 180 giri deve essere almeno il 2%. Non si può dire lo stesso per quanto riguarda le miscele in prequalifica.

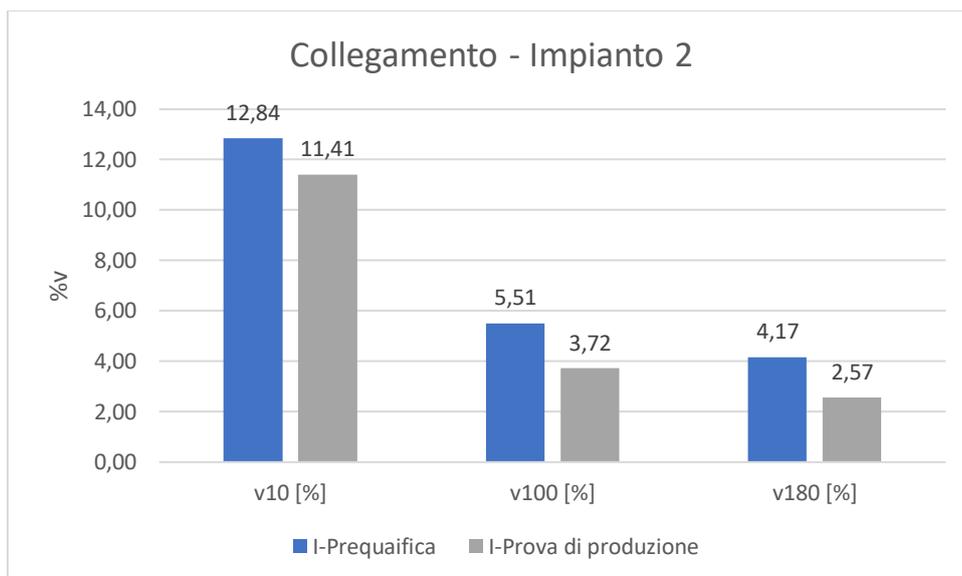


Grafico 18 - %v a 10, 100 e 180 giri per le miscele provenienti da 2

Il grafico 18 mostra che anche in questo caso la costanza di prestazione non è del tutto rispettata, con variazioni volumetriche di picco pari al 38%. Questo è dovuto in maggior parte ad una grande variabilità a livello litico, in particolare per le classi granulometriche maggiori al 2 mm.

Valutando i valori ottenuti rispetto al Capitolato, entrambe le miscele I_p e I_c rispettano i requisiti necessari per cui è stato ritenuto interessante valutare alcune caratteristiche meccaniche per confrontare poi i risultati.

Infine, nella ricerca della costanza di prestazione tra impianti, si noti come i contenuti di vuoti a 10, 100 e 180 giri per le miscele C_c e I_c del campo prove siano del tutto simili nonostante il contenuto di bitume e lo scheletro litico siano molto differenti l'uno dall'altro.

Come per lo strato di usura, per una maggiore analisi in allegato A sono riportati i valori tabellati di lavorabilità, autoaddensamento e addensamento a 180 giri.

Si conclude l'analisi volumetrica indagando i risultati ottenuti dalle miscele per lo strato di base.

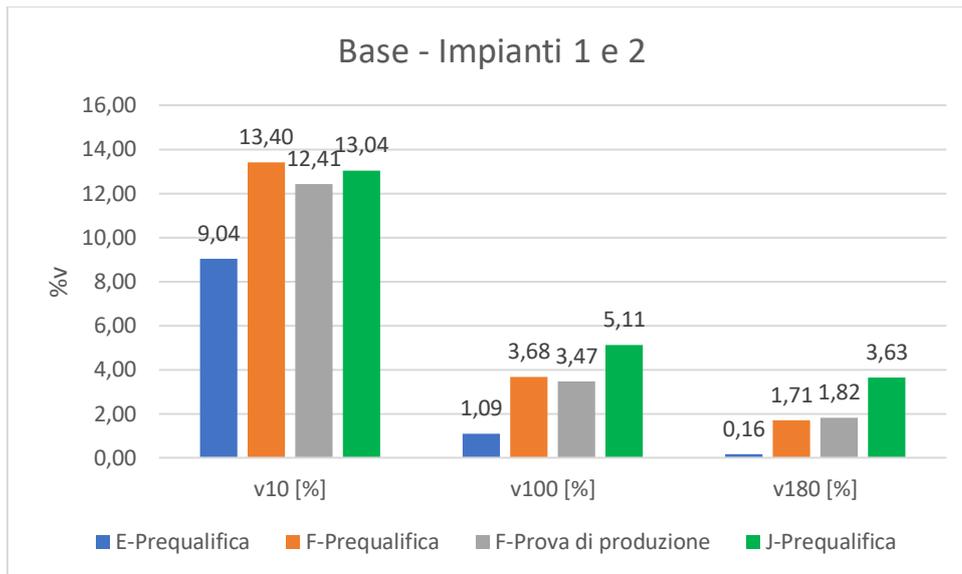


Grafico 19 - %v a 10, 100 e 180 giri per le miscele provenienti da 1 e 2

Come si può vedere nel grafico 19, la costanza di prestazione è mantenuta per l'impianto 1, ricordando che la miscela F_P in prequalifica è la miscela F_C in campo prove.

Considerando i limiti imposti dal Capitolato Speciale di Appalto in termini di percentuale di vuoti, essi sono: a 10 giri tra il 10% e 14%, a 100 giri tra il 2,5% e il 3,5% e a 180 giri almeno il 2%. La miscela E_P non rispetta nessuno dei limiti imposti, probabilmente a causa del contenuto di legante che è molto maggiore rispetto alle altre miscele, anche se da quel punto di vista è l'unica che rispetta i vincoli di Capitolato. Le miscele F_P e F_C all'incirca rispettano quanto richiesto da Capitolato, così come la miscela J_P a meno della percentuale di vuoti a 100 giri. Va ricordato però che il contenuto di bitume utilizzato non è sufficiente per nessuna delle tre miscele appena citate.

Per approfondimenti per quanto riguarda le curve di compattazione, si rimanda all'allegato A.

Di seguito si riportano e analizzano i risultati in termini di VMA e VFB per ogni miscela analizzata (tabelle 9-11), calcolati rispetto ai vuoti a 100 giri.

Tabella 9 - Valori di VMA e VFB per le miscele dello strato di usura

USURA - PREQUALIFICA			
IMPIANTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
1	A _p	15,1	87,5
	B _p	15,5	90,7
2	G	16,7	78,3
	H _p	18,4	71,3

USURA - PROVA DI PRODUZIONE			
IMPIANTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
1	A _c	14,9	86,9
2	H _c	19,3	67,9

USURA - STESA			
IMPIANTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
2	H _s	17,8	77,3

Due parametri importanti da analizzare che danno altre informazioni riguardo la miscela, sono il VMA (i vuoti nella miscela di aggregati), che rappresenta la somma dei vuoti della miscela compresi i vuoti riempiti da bitume effettivo, e il VFB (vuoti riempiti da bitume). Il campione deve avere una quantità di vuoti tali da permettere al bitume di creare un film abbastanza spesso sulla superficie di ogni aggregato. Questo fa aumentare notevolmente le prestazioni meccaniche. Allo stesso tempo, un contenuto eccessivo di vuoti potrebbe portare a problemi legati al fenomeno della fatica e a un accumulo di deformazioni permanenti eccessivo. Concludendo, è necessario trovare la combinazione corretta di VMA e VFB per le caratteristiche richieste.

Osservando i valori in tabella 9, si può affermare che il valore di VMA di tutte le miscele esaminate nelle varie fasi di progettazione è pressoché costante, mentre a variare sensibilmente tra i due impianti è il VFB. Correlando i dati in tabella con i grafici inerenti i vuoti, si può affermare che il contenuto di VFB nelle miscele dell'impianto 1 è eccessivo rispetto al corrispettivo valore di VMA, potendo portare a problematiche legate alle

deformazioni permanenti come l'espulsione di bitume sotto carico. Per quanto riguarda l'impianto 2, sarà necessario verificare con delle prove meccaniche se il VFB è sufficiente per garantire buone caratteristiche. A differenza dell'impianto 1, il VFB dell'impianto 2, inoltre, è molto più variabile all'interno delle diverse fasi di produzione.

Tabella 10 - Valori di VMA e VFB per le miscele dello strato di collegamento

COLLEGAMENTO - PREQUALIFICA			
IMPIANTO	MISCELA	%B _{MIX}	%B _{AGG}
1	C _P	14,6	84,1
	D _P	15,0	81,6
2	I _P	16,0	65,6

COLLEGAMENTO - PROVA DI PRODUZIONE			
IMPIANTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
1	C _C	15,5	77,6
2	I _C	14,1	73,7

Come per lo strato di usura, anche per lo strato di collegamento il contenuto di VFB per l'impianto 1 è maggiore del VFB per l'impianto 2 ma non nell'ultima fase di prova di produzione, dove i valori sono piuttosto simili. Questo è confermato anche dai grafici del contenuto di vuoti. Valgono le stesse considerazioni fatte per lo strato di usura. Da sottolineare che il VMA per lo strato di collegamento è più basso rispetto a quello dello strato di usura, per cui ci sarà meno spazio a disposizione per il bitume.

Tabella 11 - Valori di VMA e VFB per le miscele dello strato di collegamento

BASE - PREQUALIFICA			
IMPIANTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
1	E _p	13,2	91,7
	F _p	13,1	72,0
2	J _p	15,1	66,2

BASE - PROVA DI PRODUZIONE			
IMPIANTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
1	F _{pl}	13,5	74,9

In tabella 11 si osservano i valori di VMA e VFB per lo strato di base nei diversi impianti. Il valore di VMA è piuttosto simile all'interno dello stesso impianto 1, mentre per l'impianto 2 è leggermente più alto. Valutando il VFB, si nota che E_p, con un contenuto di bitume circa dell'1% maggiore rispetto a tutte le altre miscele di base, mostra un valore davvero elevato che, relazionandolo al grafico sul contenuto di vuoti, mostra come effettivamente vi sia troppo bitume effettivo che ricopre gli aggregati. Per le altre miscele, il valore di VFB è più simile a quello degli altri strati del pacchetto legato ma con ogni probabilità non è sufficiente a garantire le funzioni richieste dalla pavimentazione, essendo da mix design troppo basso rispetto ai requisiti di Capitolato.

4.2 Analisi delle caratteristiche meccaniche

Una volta analizzate quelle che sono le caratteristiche essenziali delle diverse miscele esaminate e appurato che la costanza della prestazione nelle diverse fasi di progettazione è sì mantenuta all'interno dei singoli impianti, ma con scarsi risultati in termini di confronto tra impianti e in riferimento a quanto richiesto dal Capitolato Speciale d'Appalto, in questa fase si vogliono verificare alcune caratteristiche meccaniche, in relazione alla natura di pavimentazione perpetua.

In primis si è voluto verificare che, come citato nel sito ufficiale dell'azienda produttrice dell'additivo antighiaccio, esso non influenzi in alcun modo le caratteristiche meccaniche delle miscele. A tal proposito, si è optato per un semplice confronto del modulo resistente per mezzo di una prova a trazione indiretta su campioni cilindrici analizzando le differenze tra G ed H_P (entrambi strati usura provenienti dall'impianto 2 in prequalifica) di cui uno contiene l'additivo mentre l'altro no.

La prova è stata effettuata su tre campioni per ogni miscela confezionati con pressa a taglio girevole impostata ad altezza. Infatti, si tratta di campioni di dimensioni 100 mm in diametro e 50 in altezza.

In seguito, è stato valutato il comportamento viscoelastico dei conglomerati bituminosi per mezzo del modulo complesso andando poi a costruire le curve maestre. Questo è stato effettuato solo sulle miscele G, H_P, H_C, H_S dello strato di usura relative all'impianto 2, per valutare la costanza di prestazione nelle diverse fasi di progettazione ma allo stesso tempo verificare come varia il modulo con l'aggiunta dell'additivo antighiaccio, e sulle miscele C_P, I_P, I_C dello strato di collegamento provenienti da impianti differenti, con lo scopo di analizzare le divergenze.

In seguito, sugli stessi campioni si effettua una prova di compressione uniassiale ciclica, per valutare l'andamento delle deformazioni permanenti.

Sono state scelte queste miscele per l'analisi delle caratteristiche meccaniche predette in quanto rappresentavano meglio le richieste di Capitolato. La pista legata allo strato di base, della quale era possibile effettuare un'analisi a livello di resistenza a fatica, è stata

abbandonata a causa di carenze importanti nelle caratteristiche compositive e volumetriche in riferimento al Capitolato.

I campioni utilizzati per l'analisi sono stati realizzati per mezzo della pressa a taglio giratorio impostata ad altezza. Innanzi tutto, sono stati realizzati campioni di 150 mm di diametro e 180 mm di altezza, dopo di che per mezzo della carotatrice e della taglierina sono stati ridotti alle dimensioni di 94 mm di diametro e 130 mm di altezza. L'obiettivo è stato ottenere solo il cuore del campione compattato, senza l'effetto parete dovuto dalla modalità di compattazione, in modo da uniformare il contenuto di vuoti al loro interno. Come richiesto dal Capitolato, i campioni sono stati realizzati in modo che avessero una densità pari al 98% della densità a 100 giri. In questo contesto si è tenuto conto di una variabilità del $\pm 1\%$. Di seguito le tabelle riassuntive 12 e 13 con i valori più rappresentativi ottenuti dalla caratterizzazione delle miscele ma anche dei campioni stessi (per ogni miscela sono stati realizzati due campioni):

Tabella 12 – Caratteristiche compositive e volumetriche per i campioni degli strati di usura

USURA						
Sample	MV _{av} [Mg/m ³]	%B _{AGG}	% ρ_{100av}	v ₁ [%]	v ₂ [%]	v _{av} [%]
G	2,359	5,84%	98,3	5,03	5,58	5,31
H _p	2,309	5,96%	98,2	6,97	7,04	7,00
H _c	2,292	6,05%	98,5	7,67	7,64	7,65
H _s	2,332	6,20%	97,5	6,99	5,84	6,41

Sample	%F	v ₁₀ [%]	v ₁₀₀ [%]	v ₁₈₀ [%]	VMA [%]	VFB [%]
G	8,7	12,09	3,63	2,34	18,0	70,5
H _p	8,3	13,82	5,26	3,54	19,6	64,3
H _c	6,4	13,88	6,20	4,68	20,4	62,4
H _s	7,2	11,72	4,04	2,68	19,6	67,4

Tabella 13 – Caratteristiche compositive e volumetriche per i campioni degli strati di usura

COLLEGAMENTO						
Sample	MV _{av} [Mg/m ³]	%B _{AGG}	%ρ _{100av}	v ₁ [%]	v ₂ [%]	v _{av} [%]
C _P	2,407	5,37%	98,3	3,27	4,66	4,0
I _P	2,367	4,80%	98,3	7,06	7,82	7,4
I _C	2,443	4,47%	98,7	4,93	5,02	5,0

Sample	%F	v ₁₀ [%]	v ₁₀₀ [%]	v ₁₈₀ [%]	VMA [%]	VFB [%]
C _P	6,3	11,1	2,32	1,09	15,9	75,2
I _P	6,2	12,84	5,51	4,17	17,6	57,8
I _C	6,7	11,41	3,72	2,57	15,1	67,2

4.2.1 Rigidezza nella configurazione IT-CY

La prova di trazione indiretta su campioni cilindrici è utile per valutare la componente resiliente del modulo elastico. In questo contesto è stata utilizzata come metodo di confronto per valutare l'effetto dell'additivo antighiaccio inserito all'interno della miscela e, proprio per questa ragione, si considerano le miscele G ed H_P.

La prova è tra le richieste del Capitolato Speciale d'Appalto, che in particolare definisce come valore target per il confezionamento una densità obiettivo pari al 98% della densità che si ha 100 giri. Come detto, nell'elaborato si tiene conto di un errore pari al ± 1%. La normativa, inoltre, richiede che vengano realizzati campioni di altezza pari a 50 mm. Di seguito sono riportate le caratteristiche volumetriche mediate rispetto ai tre campioni realizzati per ogni miscela (tabella 14):

Tabella 14 - Valori volumetrici medi

USURA							
Sample	MV _{av} [Mg/m ³]	%B _{AGG}	%ρ _{100av}	v ₁ [%]	v ₂ [%]	v ₃ [%]	v _{av} [%]
G	2,380	5,84%	99,1	4,22	4,22	4,90	4,45
H _P	2,316	5,96%	97,6	6,52	6,93	7,28	6,91

Sample	%F	v ₁₀ [%]	v ₁₀₀ [%]	v ₁₈₀ [%]	VMA [%]	VFB [%]
G	8,7	12,09	3,63	2,34	17,2	74,2
H _P	8,3	13,82	5,26	3,54	19,6	64,7

Si noti come la percentuale di vuoti media dei due campioni vari in maniera importante (quasi 2%). La prova è stata effettuata su campioni condizionati a tre temperature diverse di 10°C, 20°C e 30°C, come definito da Capitolato, e ripetendo la prova due volte in modo da ottenere i risultati su due diametri tra loro perpendicolari. Si ottengono i seguenti valori mediati (tabella 15), ma in allegato B sono espressi i risultati in maniera estesa:

Tabella 15 - Modulo resiliente alle temperature di 10°C, 20°C e 30°C

USURA			
Sample	E _{10°C} [MPa]	E _{20°C} [MPa]	E _{30°C} [MPa]
G	14341	9867	5263
H _P	11510	5532	2395

Si può osservare che la variazione di modulo elastico cresce all'aumentare della temperatura, raggiungendo il 54% per i campioni condizionati a 30°C. Considerando che il contenuto di legante tra le miscele G ed H_P è pressoché costante, così come la distribuzione granulometrica e considerando che l'unico parametro a variare è il contenuto di vuoti sia in termini di campione reale che in termini di vuoti a 100 giri delle miscele, si può immaginare che probabilmente l'additivo giochi un ruolo nella composizione volumetrica, influenzando anche la rigidità della miscela. Inoltre, si noti come nonostante il contenuto di bitume all'interno delle due miscele sia quasi coincidente (tabella 14), osservando il VFB (i vuoti riempiti da bitume) vi sia una differenza di circa il 10%. Evidentemente per i campioni di H_P, il bitume riveste gli aggregati con un film troppo sottile tale da ridurre le caratteristiche di resistenza. Un altro aspetto che influenza il comportamento dei campioni è l'addensamento. Osservando le curve di compattazione (allegato A) delle due miscele si noti che a 100 giri la miscela H_P mostra una pendenza della retta di compattazione che ancora non è cambiata ad una più dolce. Questo indica che l'addensamento raggiunto non è sufficiente per garantire buone caratteristiche meccaniche.

4.2.2 Modulo dinamico e curve maestre

Per valutare il comportamento termo-visco-elastico delle miscele analizzate, si fa riferimento al modulo dinamico. Essenzialmente, viene applicato ad ogni provino un carico monoassiale a diverse frequenze (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz) e diverse temperature di condizionamento (4°C, 20°C e 40°C) per simulare l'effetto veicolare e le condizioni climatiche a cui la pavimentazione è sottoposta durante la messa in funzione.

Per la prova è stata utilizzata la UTM-30, che registra ogni valore di deformazione per mezzo di tre trasduttori a seguito del carico applicato, definendone il valore di modulo complesso E^* e l'angolo di fase. In allegato C si riportano tutti i valori medi ottenuti alle diverse frequenze sui diversi campioni.

Con questi valori di modulo E^* a diverse temperature e frequenze è possibile costruire le curve maestre. Per ciò, si sfrutta il principio di equivalenza tempo-temperatura dei conglomerati bituminosi, per cui si può ricondurre ad una determinata temperatura di riferimento, in questo caso 20°C, il valore di modulo dinamico ottenuto per un campo di frequenze ridotto, amplificandolo. Inizialmente si hanno tre curve differenti, con valori di modulo complesso differenti, a tre differenti temperature per le stesse frequenze. Attraverso gli shift-factor si passa dal dominio delle frequenze reale al dominio delle frequenze ridotte relative alla temperatura di riferimento, ottenendo un'unica curva di modulo composta dai valori delle tre curve ottenute sperimentalmente: rispetto alla temperatura di riferimento, i valori di modulo ad alte temperature vengono traslati verso sinistra, i valori di modulo ottenuti a basse temperature vengono traslati verso destra.

I dati grezzi ottenuti sperimentalmente vengono modellati come definito dal MEPDG, con alcune variazioni, ottenendo una sigmoide. L'ottimizzazione è stata eseguita per mezzo del risolutore di excel, facendo variare i parametri γ , β , δ ma anche il valore dell'asintoto vetroso $|E^*|_{\max}$. Di seguito si riportano le curve maestre relative alle sette miscele analizzate.

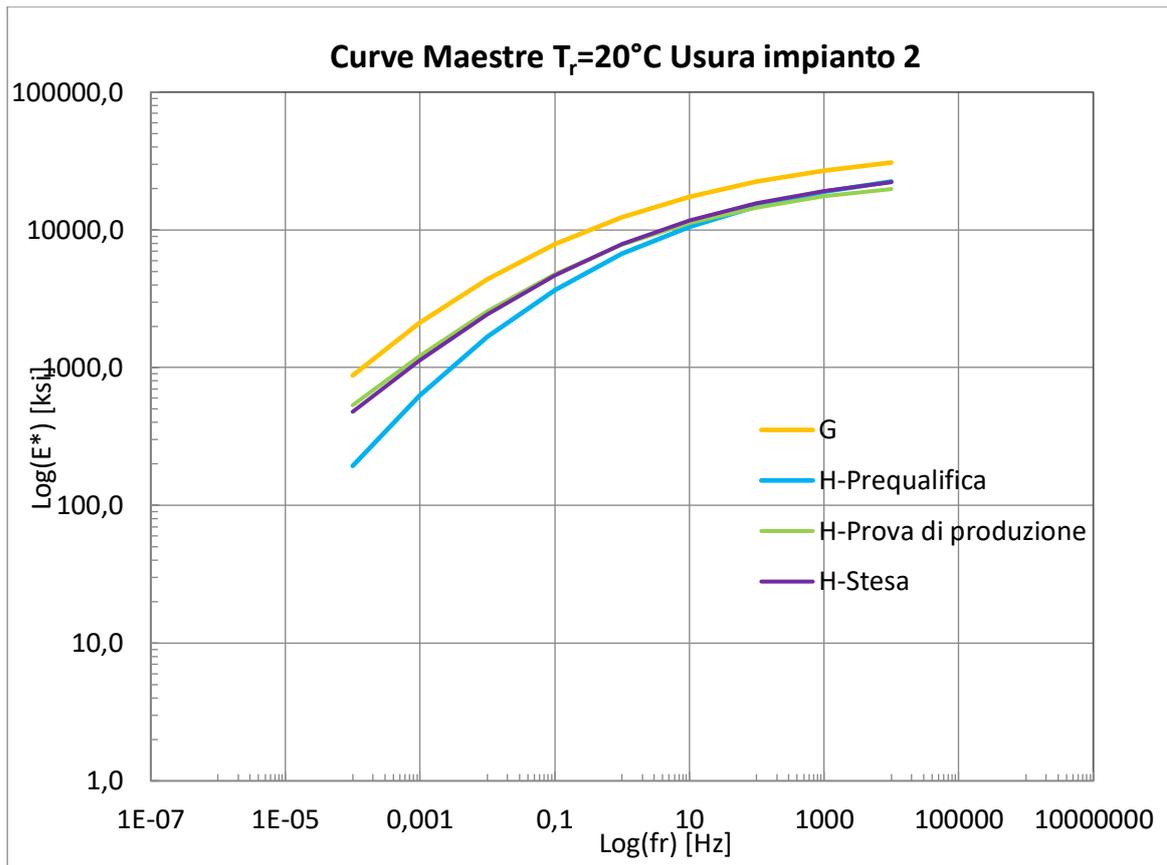


Grafico 20 – Curve maestre per G, H_p, H_c, H_s dell'impianto 2

Il grafico 20 mostra le curve maestre delle miscele G, H_p, H_c, H_s modellate nel campo di frequenze ridotte comprese tra i 10^{-4} Hz e 10^4 Hz per le ascisse e i 100 MPa e 40000 MPa per quanto riguarda i valori di modulo complesso E*.

Ogni curva rappresenta il comportamento della singola miscela bituminosa: ad alte frequenze e basse temperature si hanno i valori maggiori di modulo dinamico, che tendono all'asintoto vetroso dove il comportamento del conglomerato bituminoso è dominato dal bitume. Qui la miscela tende ad essere molto rigida. Al contrario, per basse frequenze ed alte temperature, il comportamento della miscela bituminosa tende ad essere viscoso, essendo che il bitume in quella zona tende ad essere viscoso e fluisce, così che il comportamento è influenzato per lo più dallo scheletro litico.

Analizzando le curve, si nota immediatamente come vi sia una quasi completa coincidenza tra H_c e H_s, nonostante vi sia una differenza di circa 1% in termini di vuoti (tabella 12) e

nonostante le curve granulometriche si discostino a sufficienza per tutto ciò che è trattenuto ai setacci fino a 2 mm. La miscela H_P, che in precedenza mostrava una buona continuità di prestazione in termini composizionali con la miscela H_C, in questo caso si discosta in maniera netta alle basse frequenze e alte temperature, a partire dai 10 Hz (sopra i 10 Hz il comportamento visco-elastico è molto simile a quello di H_C e H_S). Per H_P in realtà ci si aspettava un comportamento simile a quello di H_C, avendo un contenuto di vuoti molto simile così come il contenuto di bitume e la distribuzione granulometrica. Evidentemente, come sottolineato in 4.2.1, il livello di compattazione raggiunto non è sufficiente. Per quanto riguarda la miscela G, il comportamento visco-elastico è del tutto in linea con quanto ci si aspettava: avendo un contenuto di vuoti minore di circa il 2% rispetto alle miscele con l'aggiunta di additivo antighiaccio, i valori di modulo complesso dovevano essere necessariamente maggiori. Osservando quindi una certa continuità a livello composizionale, si pensa che l'assenza di antighiaccio permetta di realizzare un campione con una porosità minore, confermando quanto visto nel capitolo 4.1.4 e nel capitolo 4.2.1.

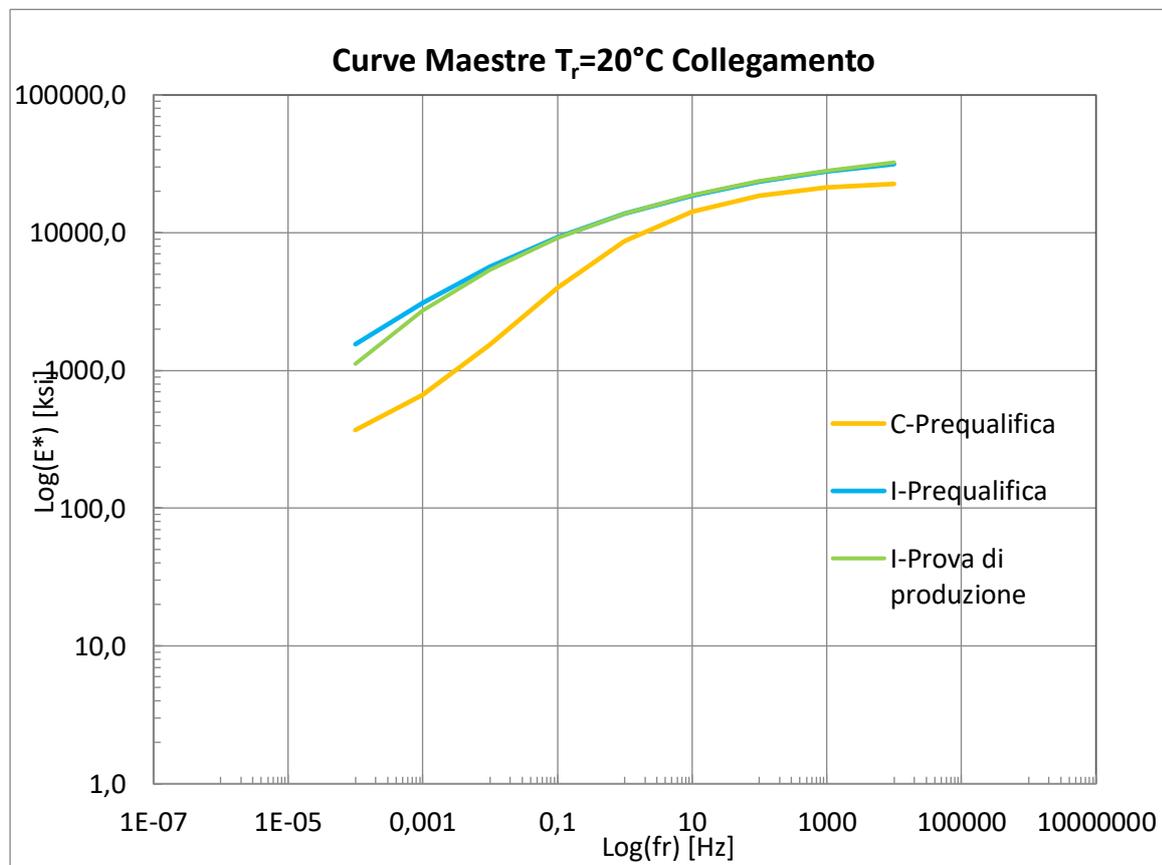


Grafico 21– Curve maestre per C_P, I_P, I_C

Il grafico 21 mostra le curve maestre delle miscele C_P , I_P , I_C modellate nel campo di frequenze ridotte comprese tra i 10^{-4} Hz e i 10^4 Hz per le ascisse e i 300 MPa e 30000 MPa per quanto riguarda i valori di modulo complesso E^* .

Nonostante le miscele provenienti dall'impianto 2 (I_P e I_C) mostrino delle divergenze a livello di composizione (contenuto di bitume e distribuzione granulometrica) e di volumetria, il comportamento visco-elastico è quasi del tutto coincidente, mantenendosi su valori molto alti di modulo complesso E^* , rispetto alla miscela per strato di collegamento prodotta da 1. Evidentemente, per quanto concerne lo strato di collegamento, i limiti imposti dal Capitolato Speciale d'Appalto, che vengono rispettati sempre sia da I_P che da I_C , sono sufficienti per ottenere lo stesso comportamento a livello di rigidità.

In questo contesto si è scelto di analizzare anche una miscela proveniente dall'impianto 1 per valutare come varia la rigidità in confronto alle miscele dell'impianto 2. Si osserva che su tutto il campo delle frequenze analizzato, il modulo complesso E^* di C_P si mantiene su valori sempre minori rispetto a I_P e I_C . La transizione tra comportamento molto rigido (alte frequenze e basse temperature) e comportamento dipendente quasi unicamente dallo scheletro litico (basse frequenze e alte temperature) è molto netta. Osservando i dati relativi alla composizione e alla volumetria, evidentemente il contenuto di legante che è di 1 punto percentuale maggiore rispetto a I_P e I_C in relazione ad una curva granulometrica poco ricca di aggregati grossolani, genera questo comportamento. L'asintoto vetroso si mantiene a valori più bassi rispetto a quello delle miscele dell'impianto 2 perché, nonostante il contenuto elevato di bitume, la mancanza di aggregati grossi non permette alla miscela di avere uno scheletro litico forte. Allo stesso modo, la transizione rigido-viscoso è molto netta a causa dell'elevato contenuto di bitume.

4.2.3 Flow number

Gli stessi campioni del modulo dinamico vengono utilizzati per qualificare la loro resistenza alle deformazioni permanenti per mezzo di una prova distruttiva di compressione ciclica monoassiale detta “flow number test”. Questa prova ha molta rilevanza per lo strato di usura, essendo lo strato più superficiale e a diretto contatto con gli pneumatici dei veicoli e quindi primo strato soggetto ai carichi veicolari, ma anche per lo strato di collegamento, in quanto per il design di una pavimentazione perpetua, questo strato deve essere altamente resistente alle deformazioni permanenti.

I campioni sottoposti alla prova sono stati condizionati alla temperatura di 55°C, come definito da Capitolato, e i risultati ottenuti sono espressi nelle seguenti tabelle.

Tabella 16 – Flow number e relativo microstrain per strati di usura

USURA						
Sample	FN ₁	FN ₂	FN _{AV}	MICROSTRAIN AT FN ₁	MICROSTRAIN AT FN ₂	MICROSTRAIN AT FN _{AV}
G	7356	6159	6758	14049	20464	17257
H _P	225	222	224	19764	13353	16559
H _C	426	6328	3377	19638	14884	17261
H _S	600	1684	1142	23423	14700	19062

I dati ottenuti per lo strato di usura mostrano un’ampia variabilità. A prima vista si nota una netta differenza tra i valori ottenuti per le miscele senza l’aggiunta del sale antighiaccio e quelle con sale. Osservando i dati in tabella 12, si osserva che le variazioni più significative sono a livello dei vuoti delle diverse miscele a 100 giri, dei vuoti residui sul campione e del VFB. La combinazione di G è quella per cui il VFB è tale da permettere alla miscela di essere deformata senza che il bitume venga espulso e la percentuale di vuoti è tale da ottenere alti valori di flow number per un valore di deformazione che è nella media dei valori ottenuti sui campioni senza antighiaccio. La miscela H_P ha degli evidenti problemi legati al flow number, in quanto su entrambi i campioni la rottura è giunta dopo pochi cicli di carico. Questo è imputabile ad una scarsa compattazione a 100 giri: dalle curve di compattazione, infatti, si nota come l’addensamento non sia nella fase con pendenza più dolce e quindi sono ancora possibili fenomeni di post compattazione. I due campioni di H_C mostrano un comportamento tra loro non comparabile, nonostante

abbiano valori di MV, %v, VMA e VFB quasi coincidenti. L'unica differenza è nella geometria dei campioni, con H_{C1} che mostra un'altezza piuttosto irregolare, con variazione massima di 1 mm. Questo è un parametro che può influenzare la prova. Si noti anche che il contenuto di filler è del 2% minore rispetto a quello di H_C , influenzando positivamente sulla resistenza alle deformazioni permanenti ma allo stesso tempo i valori di VMA e VFB sono simili. Per quanto riguarda i campioni H_S dell'impianto 2, si nota una differenza non eccessiva nel valore di flow number, imputabile alla diversa densità e volumetria dei campioni: per H_{S1} il contenuto di vuoti è pari al 6,99% mentre per H_{S2} è 5,84% che raggiunge il target di densità richiesto dal Capitolato. Infatti, osservando i valori di accumulo di deformazioni permanenti, il primo campione ha subito una deformazione molto più elevata e in un numero minore di cicli. Sebbene i valori di FN nelle diverse fasi di progettazione non siano del tutto concordi, è comunque utile osservare che per tutti gli strati di usura analizzati il passaggio da creep secondario a terziario, e quindi a rottura, avviene per valori di accumulo di deformazioni permanenti molto simile. Per concludere, si riportano gli andamenti della deformazione permanente in funzione del numero di cicli (grafico 22): questi mostrano una scarsa continuità di prestazione, dovuta principalmente a fattori legati al contenuto di vuoti, come precedentemente descritto.

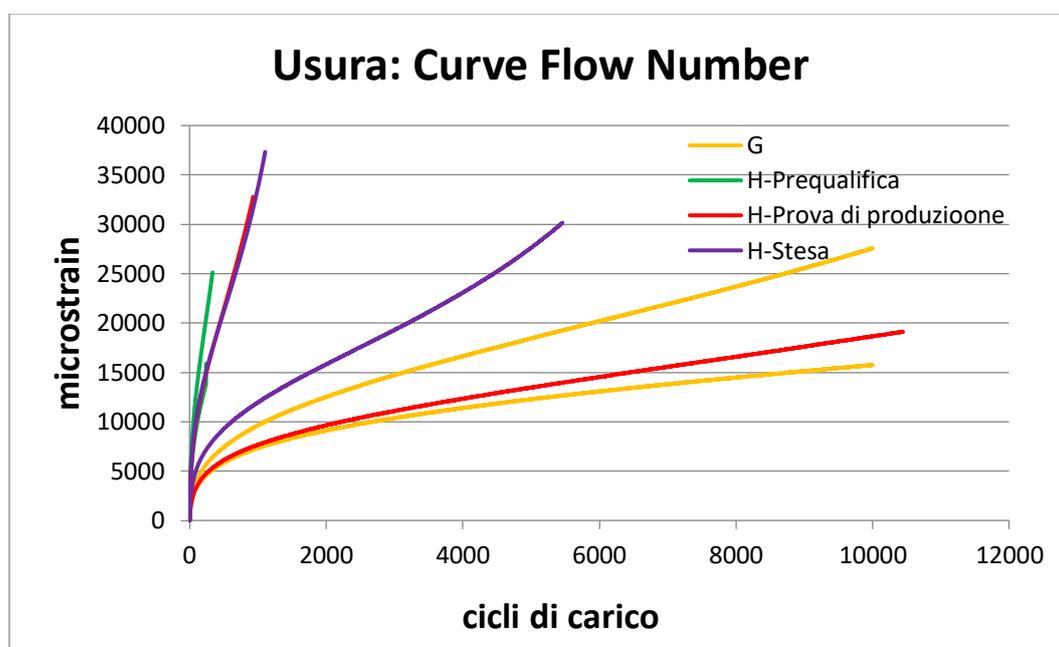


Grafico 22 – Curve di flow number per G, H_P , H_C , H_S

Per concludere, il valore di riferimento minimo di FN suggerito da AASHTO T 378-17 per l'autostrada in questione (livello di traffico maggiore di 30 milioni di ESALs) e di 740. Questo valore non sempre è rispettato, data la grande variabilità dei campioni analizzati.

Tabella 17 - Flow number e relativo microstrain per strati di collegamento

COLLEGAMENTO						
Sample	FN ₁	FN ₂	FN _{AV}	MICROSTRAIN AT FN ₁	MICROSTRAIN AT FN ₂	MICROSTRAIN AT FN _{AV}
C _p	1094	1073	1084	19217	27594	23406
I _p	6740	9958	8349	7232	10813	9022
I _c	7699	9520	8610	15221	15056	15139

Osservando i valori risultanti dall'analisi del flow number (tabella 17) si può subito notare come la costanza di prestazione non è mantenuta tra i due impianti, ma nel singolo impianti 2 sì. Questo conferma quanto visto finora.

Da un'analisi più specifica, si vuole indagare sulle motivazioni di valori di flow number così differenti. Osservando i dati volumetrici e compositivi delle miscele in esame si può notare come probabilmente gli elementi più impattanti siano il contenuto di bitume e l'addensamento (tabella 13). Infatti, per C_p il contenuto di vuoti del campione e quello a 100 giri della miscela in fase di caratterizzazione è evidentemente più basso rispetto a quelli di I_p e I_c. Allo stesso tempo, il contenuto di bitume è superiore di quasi l'1%. Questi dati portano ad avere valori di VMA che sono pressoché costanti nei tre campioni (ma relativamente bassi), ma allo stesso tempo avere valori di VFB per il campione C_p nettamente superiore rispetto ad I_p e I_c. Fisicamente accade che sotto il carico ripetuto e a temperature relativamente alte, a causa di un contenuto di vuoti intergranulare molto basso e un quantitativo eccessivo di bitume, avviene l'espulsione di bitume che porta ad avere la rottura per un numero di cicli di carico relativamente basso e con una deformazione permanente cumulata decisamente elevata.

Al contrario, i campioni ottenuti dalle miscele dell'impianto 2 mostrano un'alta resistenza alle deformazioni permanenti avendo un valore di flow number molto elevato con un accumulo di deformazioni permanenti decisamente basso per il numero di cicli. Le

motivazioni si ritrovano esattamente nel contenuto di vuoti maggiore a 100 giri, nel contenuto di bitume minore rispetto a C_p , così come il VFB minore.

Il valore di riferimento minimo di FN suggerito da AASHTO T 378-17 per l'autostrada in questione (livello di traffico maggiore di 30 milioni di ESALs) è di 740, che è sempre superato dai campioni esaminati.

Di seguito di riporta il grafico 23 che riassume il comportamento dei diversi campioni in termini di microstrain, al variare del numero di cicli.

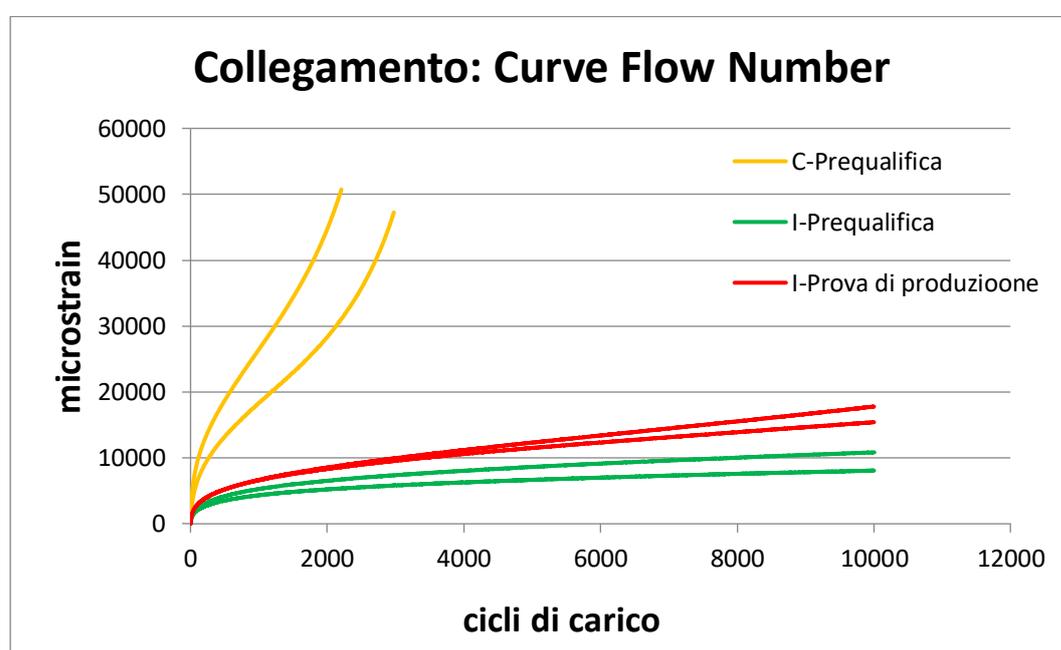


Grafico 23 – Curve di flow number per C_p , I_p , I_c

Come si nota, nel grafico sono rappresentate le coppie di campioni per ogni miscela analizzata, mostrando un comportamento tra loro molto simile.

5 Conclusioni

La presente indagine è stata effettuata in seguito alla richiesta da parte di due imprese incaricate per la riqualifica di un tratto di pavimentazione autostradale della A32 riguardante gli strati più superficiali in conglomerato bituminoso. La riqualifica prevede la realizzazione di un pacchetto legante e sottofondo che avesse le caratteristiche di una pavimentazione perpetua. Al laboratorio del DIATI del politecnico di Torino sono arrivate, in momenti differenti, le miscele bituminose sfuse riguardanti diverse fasi della progettazione, dalla fase di prequalifica, passando per la fase di prova di produzione alla fase di stesa vera e propria. Nel complesso, sono state analizzate 16 miscele (9 provenienti dal primo impianto e 7 provenienti dal secondo): 7 miscele per strato di usura, 5 per lo strato di collegamento e 4 per lo strato di base.

Le richieste delle due imprese riguardavano la verifica delle caratteristiche compositive, volumetriche e meccaniche in relazione al Capitolato Speciale d'Appalto, nonché la verifica della costanza di prestazione durante le diverse fasi di progettazione.

In relazione a ciò, in questo elaborato di tesi si è voluto verificare la possibilità di apposizione della marcatura CE per le miscele bituminose dei diversi strati in esame, in riferimento a quanto richiesto dal Regolamento prodotti da costruzione CPR 305/11 e al Capitolato Speciale d'Appalto. Sono state quindi effettuate una serie di prove di laboratorio per la caratterizzazione e la definizione delle caratteristiche essenziali dei conglomerati bituminosi, in particolare sulla composizione (contenuto di bitume tramite ignizione, distribuzione granulometrica) e la volumetria (MMVT, compattazione con pressa a taglio girevole, MV). Una vera e propria analisi della costanza di prestazione è stata resa possibile solo per lo strato di usura dell'impianto 2, da cui è arrivata anche la miscela prelevata dalla vibrofinitrice in fase di stesa. Per le altre miscele bituminose l'indagine è terminata alla fase di prova di produzione.

In seguito, sono state analizzate alcune caratteristiche meccaniche (fondamentali per la definizione delle pavimentazioni perpetue) sulle miscele che hanno mostrato i risultati migliori in termini di caratteristiche essenziali. Per prima cosa si è valutato come varia il modulo resiliente in relazione all'aggiunta o meno dell'additivo antighiaccio nello strato

di usura, dopo di che è stato valutato il comportamento viscoelastico di quattro strati di usura e tre di collegamento per mezzo della definizione del modulo dinamico e della costruzione delle curve maestre, terminando con l'analisi delle deformazioni permanenti per mezzo del test del flow number (sugli stessi campioni del modulo dinamico).

Riassumendo ciò che è emerso dall'indagine sperimentale:

- Per lo strato di usura, la costanza di prestazione per quanto concerne il contenuto di bitume è mantenuta all'interno di ogni singolo impianto e anche tra impianti. In più i limiti imposti da Capitolato vengono rispettati. Per lo strato di collegamento, la continuità è rispettata all'interno del singolo impianto ma non tra impianti: l'impianto 1 si attesta su valori nell'intorno del limite superiore imposto da Capitolato, mentre l'impianto 2 sul limite inferiore, con una differenza di contenuto di bitume pari a circa 1% tra i due. Per quanto concerne lo strato di base, la costanza di prestazione è mantenuta per l'impianto 1, nonostante non si rispettino i limiti imposti da Capitolato. Per quanto riguarda l'impianto 2, non è possibile verificare la continuità per mancanza di dati, ma si può affermare che a livello di prequalifica il contenuto di bitume è simile a quello dell'impianto 1.
- Analizzando le distribuzioni granulometriche, emergono queste considerazioni: per lo strato di usura, in entrambi gli impianti le curve granulometriche si inseriscono all'interno del fuso definito dal Capitolato ma, mentre per l'impianto 1 si attestano nell'intorno del centro fuso, per l'impianto 2 le curve sono più vicine al limite superiore, per cui si hanno meno aggregati grossolani rispetto ad 1. In ogni caso, si può dire che all'interno del singolo impianto la continuità di prestazione viene mantenuta a meno della miscela H_s prelevata dalla vibrofinitrice durante la stesa proveniente dall'impianto 2, in cui la curva si discosta sensibilmente da quelle di prequalifica e campo prove ma si avvicina al centro fuso. Per quanto riguarda lo strato di collegamento, la costanza di prestazione viene mantenuta nell'impianto 1 ma non del tutto nell'impianto 2, in cui le distribuzioni granulometriche di prequalifica e prova di produzione si discostano sensibilmente l'una dall'altra. Analizzando però i risultati in relazione al fuso di Capitolato Speciale d'Appalto, le miscele provenienti dall'impianto 2 rispettano i limiti, mentre le miscele dell'impianto 1 superano il limite

superiore imposto per gli aggregati progressivamente trattenuti fino al setaccio di 8 mm. Analizzando lo strato di base, la continuità è mantenuta all'interno dell'impianto 1. Per quanto riguarda 2, la miscela in prequalifica ha caratteristiche granulometriche simili a quella in prequalifica di 1 non portata avanti durante la fase di prova di produzione.

- Analizzando il contenuto di vuoti a 10, 100 e 180 giri, si afferma che la costanza di prestazione è mantenuta all'interno dell'impianto 1 per le diverse fasi di progettazione e per tutti gli strati. Allo stesso tempo, le richieste di Capitolato non vengono rispettate soprattutto a 100 e 180 giri, mostrando valori di percentuale di vuoti eccessivamente basse (addensamento troppo elevato). Al contrario nell'impianto 2 vengono sempre rispettati i vincoli imposti dal Capitolato Speciale d'Appalto, anche se si notano degli scostamenti maggiori in termini volumetrici: per lo strato di usura la continuità è mantenuta tra la fase di prequalifica e prova di produzione, mentre per lo strato di collegamento sono visibili variazioni di percentuale di vuoti fino al 2%. Questo è probabilmente dovuto alla variazione del fuso granulometrico, che nell'ultima fase di progettazione quasi coincide con il centro fuso.
- Dal confronto sul modulo resiliente (tramite prova di trazione indiretta su campioni cilindrici) della miscela bituminosa senza additivo antighiaccio (G) e la miscela bituminosa di prequalifica con l'additivo (H_p), emerge che all'aumentare della temperatura di condizionamento della prova fino a 30°C il modulo non si mantiene costante ma vi è una riduzione fino al 54%. Essendo le caratteristiche compositive delle due miscele pressoché costanti, si pensa che l'additivo influisca sulla volumetria (unico parametro con variazioni significative) e di conseguenza sulle caratteristiche di rigidità. A condizionare i risultati vi è anche la scarsa compattazione a 100 della miscela H_p .
- Dall'analisi viscoelastica emerge quanto segue: le curve maestre per i campioni di strato di usura nelle diverse fasi di progettazione per l'impianto 2 coincidono ad alte frequenze e basse temperature, mentre a basse frequenze e alte temperature la miscela di prequalifica con additivo (H_p) si discosta sensibilmente mostrando un andamento del modulo complesso molto simile a quello che si è ottenuto con la prova a trazione indiretta. Il campione della miscela senza additivo antighiaccio (G), rispetto a quelli con additivo, ha valori di modulo complesso che si mantengono sempre

maggiori su tutto il campo delle frequenze ridotte. Ciò era preventivabile avendo un contenuto di vuoti minori rispetto ad essi. Analizzando lo strato di collegamento, è visibile la costanza di prestazione all'interno dell'impianto 2 nonostante vi siano alcune discrepanze soprattutto a livello di distribuzione granulometrica che potevano far pensare ad altro. L'evidenza mostra che è sufficiente rispettare i vincoli di Capitolato, per quanto concerne le caratteristiche essenziali, per ottenere comportamenti analoghi in termini di viscoelasticità. Dal confronto delle miscele di prequalifica provenienti dai due impianti emerge che la miscela dell'impianto 1 ha un comportamento viscoelastico peggiore rispetto a quella dell'impianto 2, con valori di modulo dinamico minori su tutto il campo delle frequenze, dovuto principalmente alla distribuzione granulometrica differente.

- Dalla prova di compressione monoassiale emerge che il comportamento dei campioni analizzati per strato di usura provenienti dall'impianto 2 è relativamente variabile, dovuto principalmente al contenuto di vuoti finale e all'addensamento per le singole miscele osservato in fase di caratterizzazione volumetrica. In generale però si nota una più alta resistenza alle deformazioni permanenti per i campioni in assenza di additivo antighiaccio. Per lo strato di collegamento, la continuità di prestazione è decisamente mantenuta in impianto 2, mostrando allo stesso tempo una grandissima resistenza alle deformazioni permanenti. In parallelo, i campioni provenienti dall'impianto 1 mostrano una sufficiente resistenza alle deformazioni permanenti, non paragonabile a quanto ottenuto dall'impianto 2.

In conclusione, si può affermare che, per quanto concerne le caratteristiche essenziali di una pavimentazione in termini compositivi e volumetrici, la costanza di prestazione è mantenuta all'interno dei singoli impianti, nonostante l'impianto 1 non rispetti i requisiti imposti dal Capitolato Speciale d'Appalto di riferimento. Questo indica una impossibilità di produzione di miscele innovative, legata soprattutto al tipo di impianto di vecchia generazione. Allo stesso tempo, la costanza di prestazione tra i due impianti non è mantenuta, a causa di scelte per il mix design differenti e legate alla natura dei due impianti. In più, dall'analisi delle caratteristiche meccaniche, emerge un'influenza da parte dell'additivo antighiaccio in termini di rigidità, che si ripercuote anche sulle caratteristiche legate alle deformazioni permanenti. Infatti quest'ultime, per quanto

variabili nelle diverse fasi di progettazione, mostrano una continuità rispetto al comportamento viscoelastico delle stesse. In ultimo, l'analisi relativa alle deformazioni permanenti sui campioni dello strato di collegamento indica una una grande resistenza da parte delle miscele dello strato di collegamento prodotte dall'impianto 2.

6 Bibliografia

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2007). *AASHTO PP 61-13 "Developing Dynamic Modulus Master Curves for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)".*

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015). *T 342-11 "Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)".*

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). *T 378-17 "Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)".*

Iterchimica. (s.d.). Tratto da Iterchimica: <https://iterchimica.it/prodotti/winterpave/>

Parlamento europeo e del Consiglio. (9 marzo 2011). *Regolamento (UE) n. 305/2011*. Strasburgo.

SITEB. (2013). *La marcatura "CE" dei conglomerati bituminosi - Adempimento per l'adeguamento al Regolamento prodotti da costruzione (CPR 305/11)*.

SITEB. (s.d.). *La progettazione delle pavimentazioni perpetue*.

The British Standard Institution. (2019). *BS EN 12697-31 "Specimen preparation by gyratory compactor"*.

The British Standard Institution. (2020). *BE EN 12697-6:2020 "Determination of bulk density of bituminous specimens"*.

The British Standard Institution. (2015). *BS EN 12697-2:2015 "Determination of the particle size distribution"*.

The British Standard Institution. (2016). *BS EN 13108-1 "Asphalt Concrete"*.

The British Standard Institution. (2016). *BS EN 13108-20 "Type Testing"*.

The British Standard Institution. (2016). *BS EN 13108-21 "Factory Production Control"*.

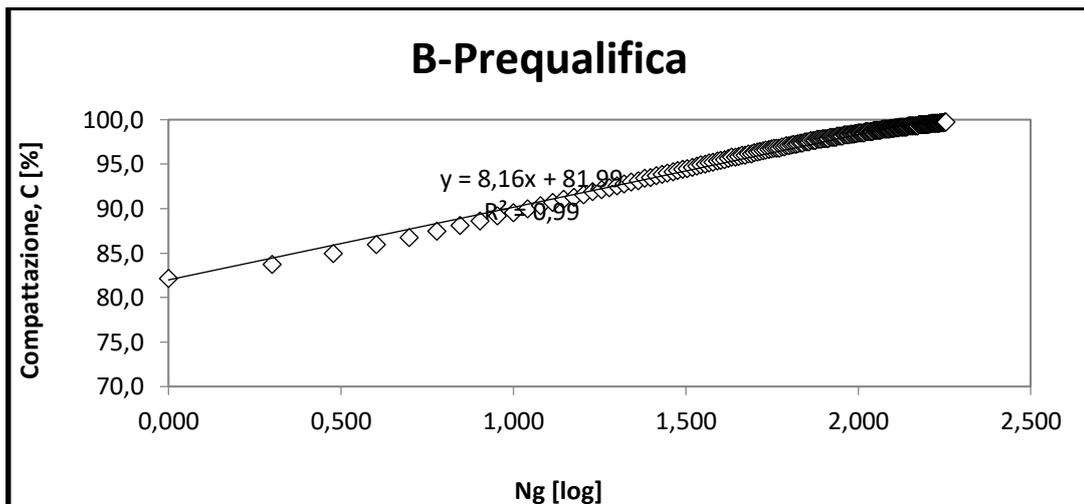
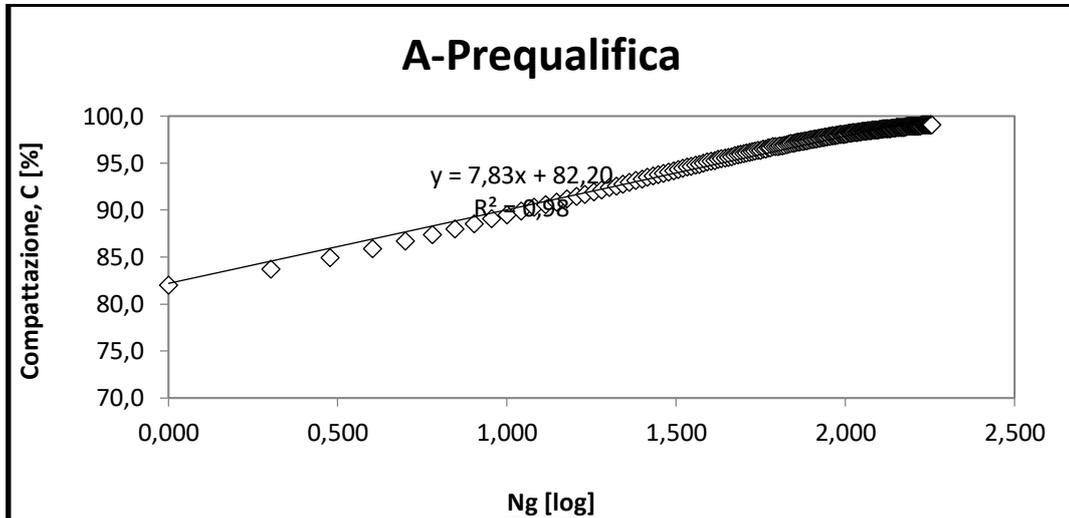
The British Standard Institution. (2018). *BS EN 1269-26:2018 "Stiffness"*.

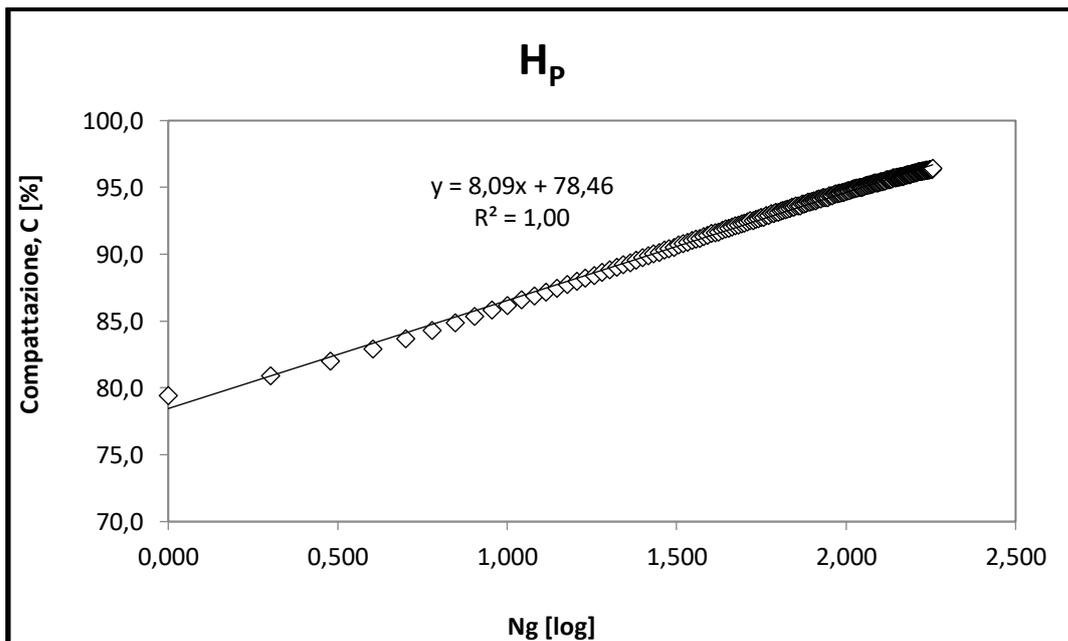
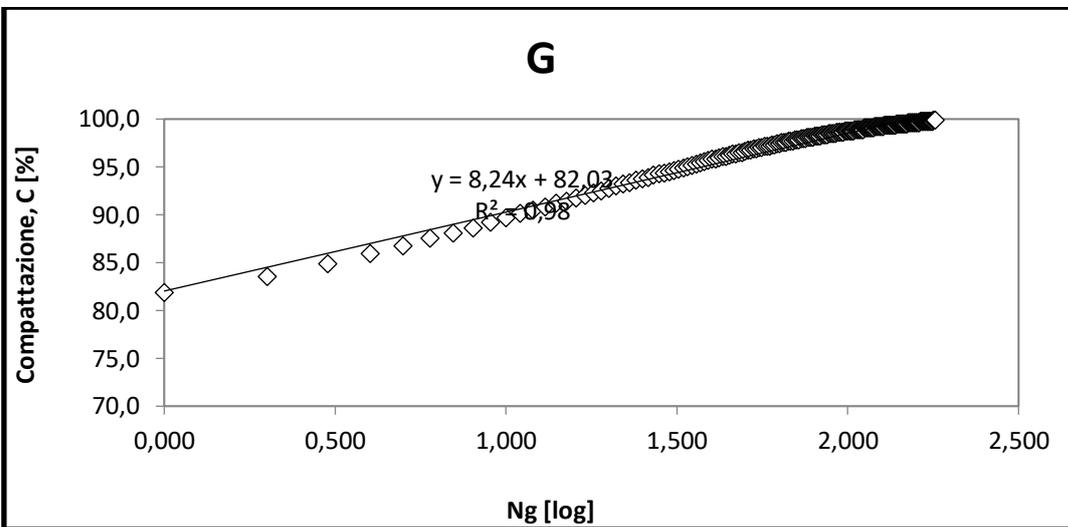
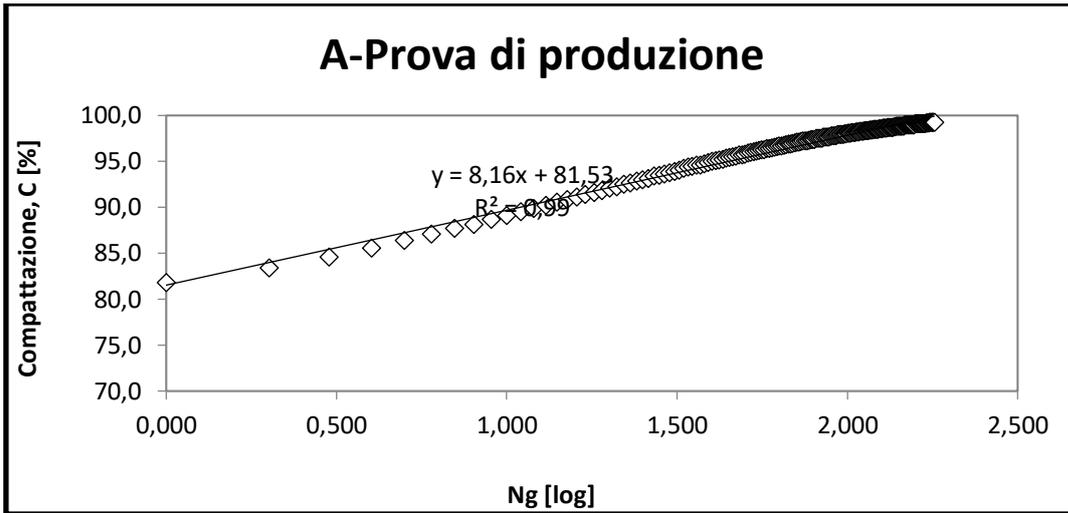
The British Standard Institution. (2018). *BS EN 12697-5:2018 "determination of the maximum density"*.

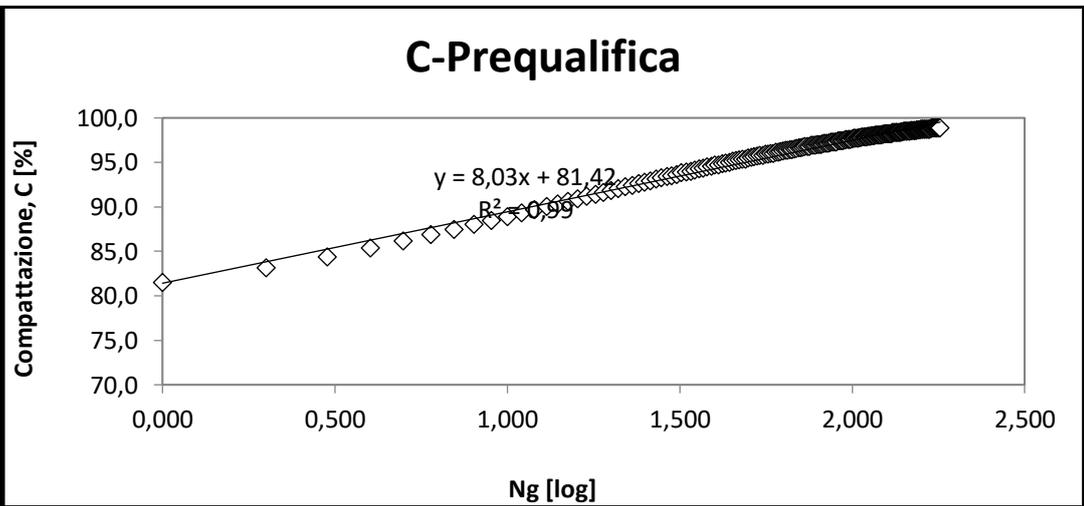
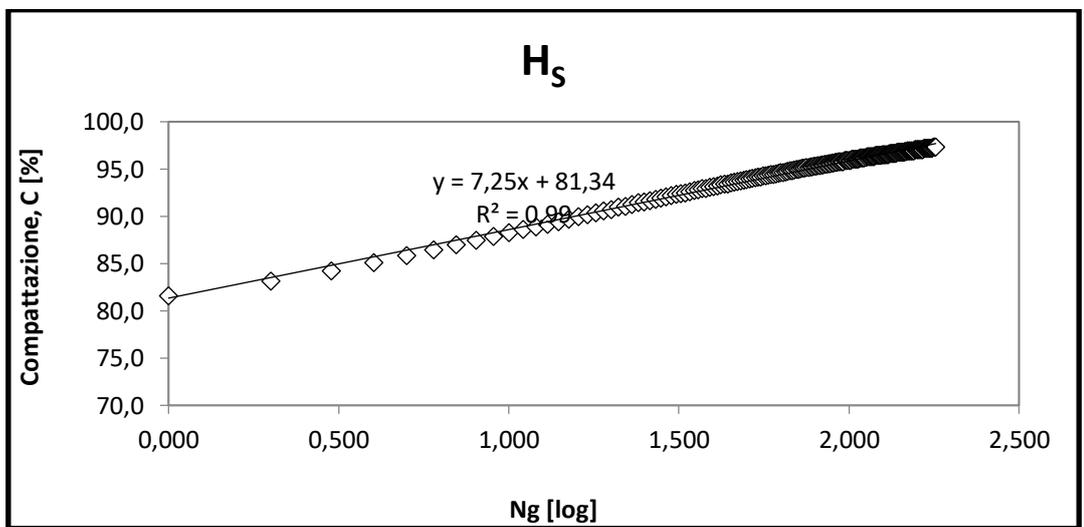
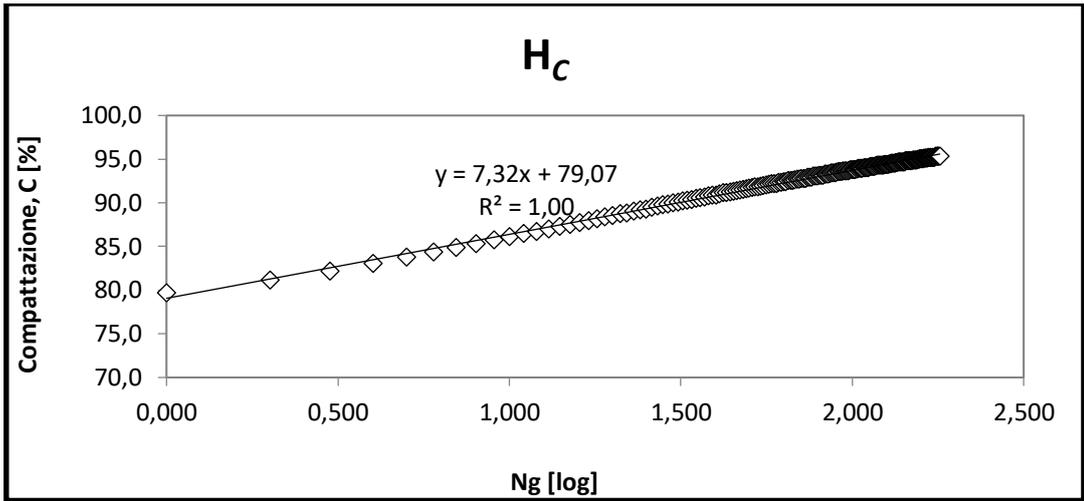
The British Standards Institution. (2020). *BS EN 12697-39:2020 - "Binder content by ignition"*.

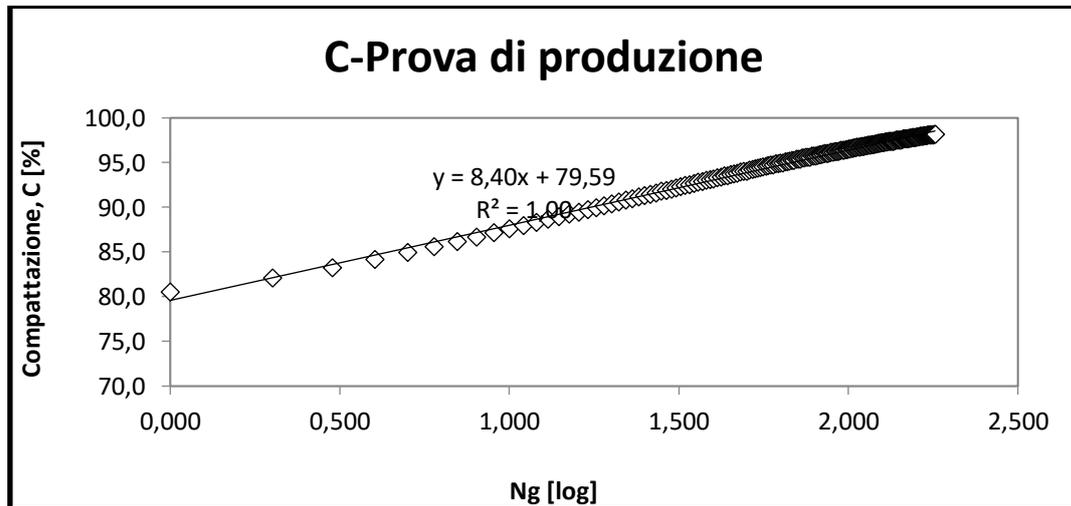
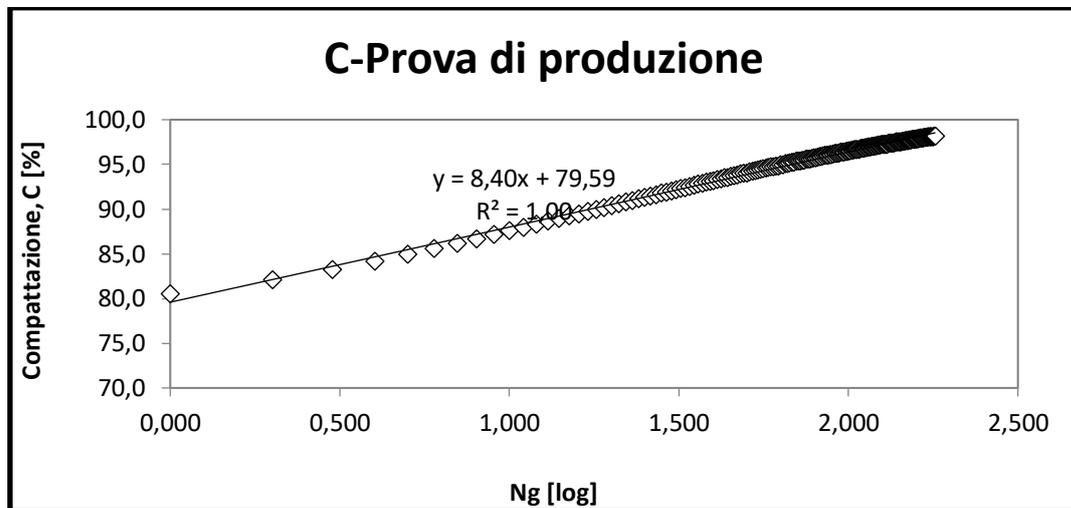
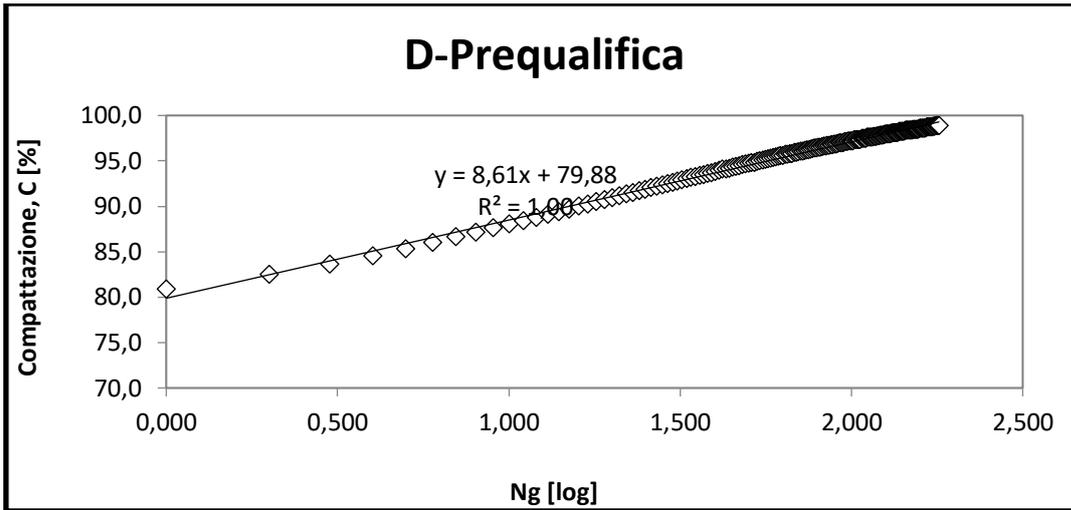
7 Allegati

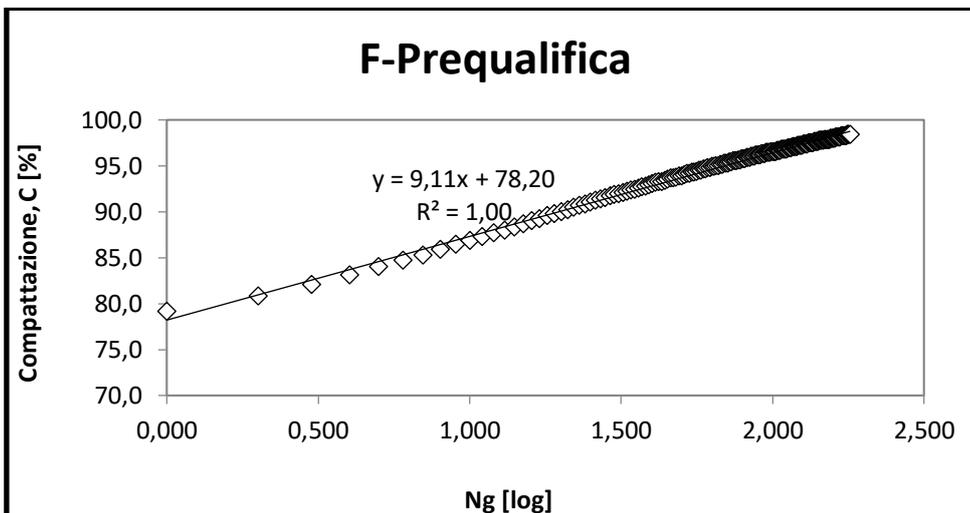
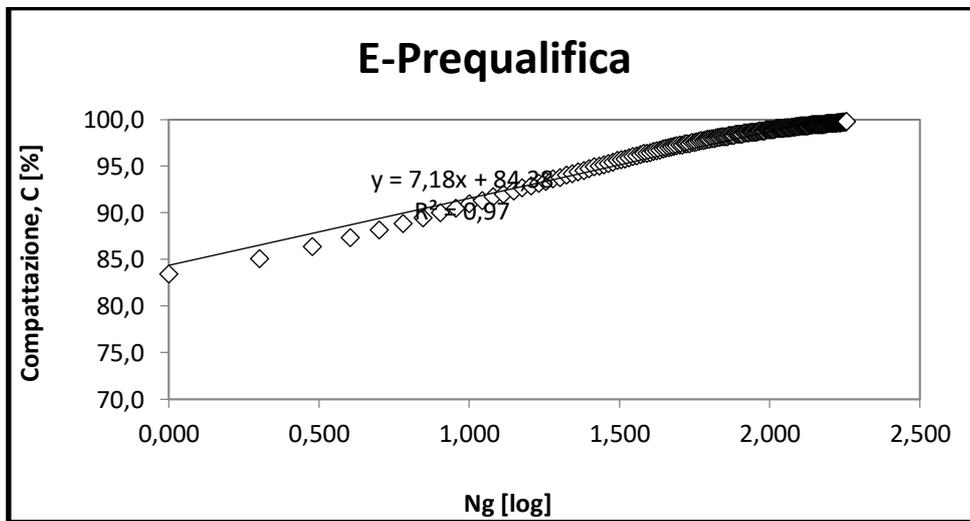
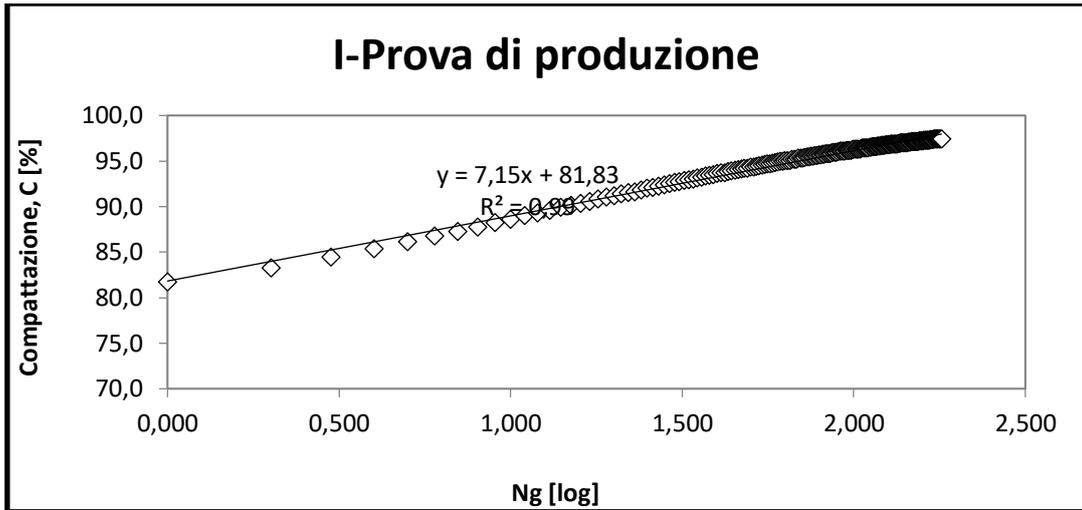
7.1 Allegato A: Compattazione con pressa a taglio giratorio

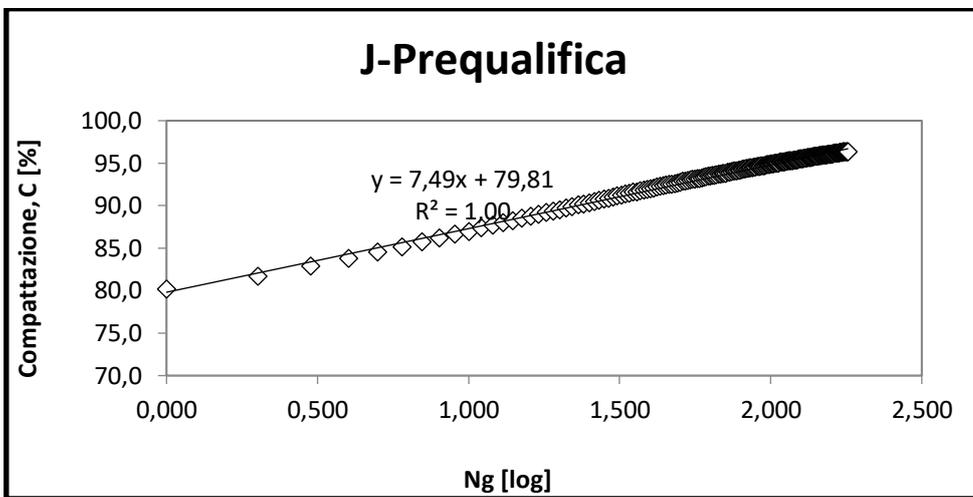
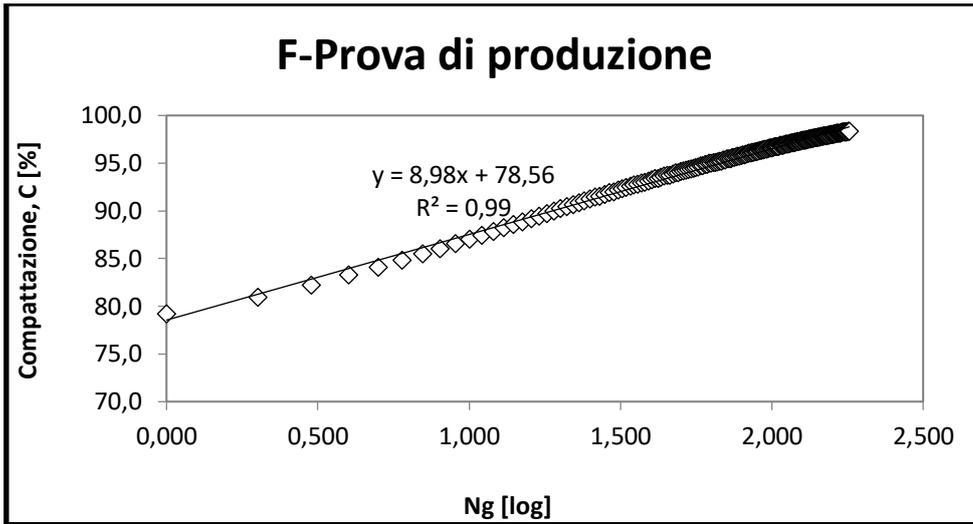












7.2 Allegato B: Rigidezza con IT-CY

CAMPIONE G

10°C				
Campione	t	ϵ	E	E_{av}
	[ms]	[μm]	[Mpa]	[Mpa]
A_D1	127,0	5,000	15602	16039
A_D2	125,8	5,171	16476	
B_D1	128,5	5,038	17732	13908
B_D2	128,6	5,476	10083	
C_D1	129,1	5,285	11095	13076
C_D2	127,8	5,020	15057	

20°C				
Campione	t	ϵ	E	E_{av}
	[ms]	[μm]	[Mpa]	[Mpa]
A_D1	127,4	6,906	9853	10020
A_D2	126,8	7,018	10187	
B_D1	128,1	7,119	10686	9906
B_D2	127,1	7,017	9125	
C_D1	127,9	6,986	9524	9674
C_D2	128,0	7,068	9824	

30°C				
Campione	t	ϵ	E	E_{av}
	[ms]	[μm]	[Mpa]	[Mpa]
A_D1	127,2	10,024	5578	5277
A_D2	128,6	10,067	4975	
B_D1	127,5	10,439	5681	5382
B_D2	129,6	9,762	5082	
C_D1	125,2	10,048	5342	5132
C_D2	128,0	9,710	4922	

CAMPIONE H_p

10°C				
Campione	t	ε	E	E _{av}
	[ms]	[μm]	[Mpa]	[Mpa]
1_D1	128,5	4,950	11755	11219
1_D2	128,0	4,991	10683	
2_D1	127,0	5,160	11244	11017
2_D2	127,0	5,059	10789	
3_D1	129,0	5,007	12096	12293
3_D2	126,3	4,997	12490	

20°C				
Campione	t	ε	E	E _{av}
	[ms]	[μm]	[Mpa]	[Mpa]
1_D1	126,5	7,000	5784	5643
1_D2	128,1	6,910	5502	
2_D1	128,4	6,996	6061	5910
2_D2	129,3	6,982	5758	
3_D1	128,2	7,016	5512	5044
3_D2	128,1	6,989	4576	

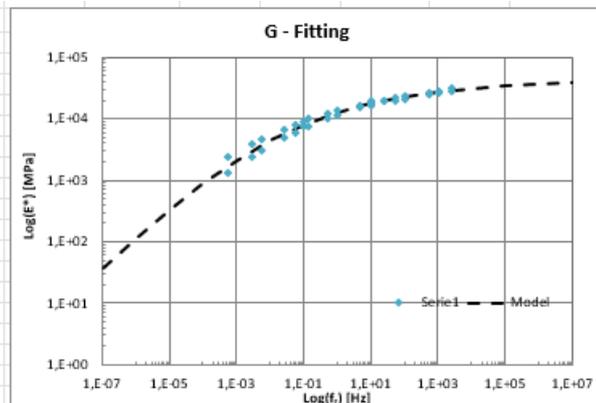
30°C				
Campione	t	ε	E	E _{av}
	[ms]	[μm]	[Mpa]	[Mpa]
1_D1	127,3	9,813	2314	2310
1_D2	128,0	9,800	2305	
2_D1	126,3	9,722	2452	2482
2_D2	127,5	9,450	2512	
3_D1	128,4	9,769	2463	2395
3_D2	127,4	9,583	2326	

7.3 Allegato C: Modulo dinamico e parametri delle curve maestre

G - Fitting			
Reference Temp [C]	20	Max	22050,5 Mpa
1ksi = 6,8948 MPa		max(log)	4,63132
1psi = 6,8948 kPa		P _e	0,86369
1psi = 0,00689 MPa		mean	
		VMA	17,96
		VFA	70,47
		A	4200000
		B	435000
		Optimized	Initial values
		δ	-0,92
		β	-2,2317
		γ	-0,3509
		Log(ΔE _g)	5,297
		ΔE _g	198153,1
		Least squares	1,17E-01

	Temperature [C]	Frequency [Hz]	Modulus psi	Modulus Mpa	Log Modulus	log[a(T)]	log f	log f _g	f _g	Log E* predicted	E* predicted	
												psi
G1	4	0,1	2,74E+06	1,89E+04	4,3	2,04E+00	-1,000	1,038	10,915	4,2	1,76E+04	
	4	0,5	3,19E+06	2,20E+04	4,3	2,04E+00	-0,301	1,737	54,577	4,3	2,11E+04	
	4	1	3,40E+06	2,34E+04	4,4	2,04E+00	0,000	2,038	109,153	4,4	2,26E+04	
	4	5	3,92E+06	2,70E+04	4,4	2,04E+00	0,699	2,737	545,767	4,4	2,58E+04	
	4	10	4,15E+06	2,86E+04	4,5	2,04E+00	1,000	3,038	1091,534	4,4	2,71E+04	
	4	25	4,44E+06	3,06E+04	4,5	2,04E+00	1,398	3,436	2728,835	4,5	2,87E+04	
	20	0,1	1,29E+06	8,92E+03	4,0	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,9	7,88E+03	
	20	0,5	1,72E+06	1,19E+04	4,1	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	4,0	1,10E+04	
	20	1	1,92E+06	1,32E+04	4,1	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	4,1	1,24E+04	
	20	5	2,42E+06	1,67E+04	4,2	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,2	1,59E+04	
	20	10	2,65E+06	1,83E+04	4,3	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,2	1,74E+04	
	20	25	2,89E+06	1,99E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,3	1,94E+04	
	40	0,1	3,38E+05	2,33E+03	3,4	-2,25E+00	-1,000	-3,255	0,001	3,2	1,71E+03	
	40	0,5	5,44E+05	3,75E+03	3,6	-2,25E+00	-0,301	-2,556	0,003	3,5	2,98E+03	
	40	1	6,54E+05	4,51E+03	3,7	-2,25E+00	0,000	-2,255	0,006	3,6	3,70E+03	
	40	5	9,71E+05	6,70E+03	3,8	-2,25E+00	0,699	-1,556	0,028	3,8	5,80E+03	
	40	10	1,15E+06	7,94E+03	3,9	-2,25E+00	1,000	-1,255	0,056	3,8	6,89E+03	
	40	25	1,48E+06	1,02E+04	4,0	-2,25E+00	1,398	-0,857	0,139	3,9	8,48E+03	
	G2	4	0,1	2,42E+06	1,67E+04	4,2	2,04E+00	-1,000	1,038	10,915	4,2	1,76E+04
		4	0,5	2,82E+06	1,95E+04	4,3	2,04E+00	-0,301	1,737	54,577	4,3	2,11E+04
4		1	3,02E+06	2,08E+04	4,3	2,04E+00	0,000	2,038	109,153	4,4	2,26E+04	
4		5	3,53E+06	2,44E+04	4,4	2,04E+00	0,699	2,737	545,767	4,4	2,58E+04	
4		10	3,76E+06	2,59E+04	4,4	2,04E+00	1,000	3,038	1091,534	4,4	2,71E+04	
4		25	4,05E+06	2,79E+04	4,4	2,04E+00	1,398	3,436	2728,835	4,5	2,87E+04	
20		0,1	1,05E+06	7,24E+03	3,9	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,9	7,88E+03	
20		0,5	1,46E+06	1,01E+04	4,0	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	4,0	1,10E+04	
20		1	1,67E+06	1,15E+04	4,1	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	4,1	1,24E+04	
20		5	2,18E+06	1,50E+04	4,2	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,2	1,59E+04	
20		10	2,44E+06	1,68E+04	4,2	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,2	1,74E+04	
20		25	2,82E+06	1,95E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,3	1,94E+04	
40		0,1	1,85E+05	1,28E+03	3,1	-2,25E+00	-1,000	-3,255	0,001	3,2	1,71E+03	
40		0,5	3,44E+05	2,37E+03	3,4	-2,25E+00	-0,301	-2,556	0,003	3,5	2,98E+03	
40		1	4,31E+05	2,97E+03	3,5	-2,25E+00	0,000	-2,255	0,006	3,6	3,70E+03	
40		5	7,01E+05	4,83E+03	3,7	-2,25E+00	0,699	-1,556	0,028	3,8	5,80E+03	
40		10	8,49E+05	5,86E+03	3,8	-2,25E+00	1,000	-1,255	0,056	3,8	6,89E+03	
40		25	1,08E+06	7,42E+03	3,9	-2,25E+00	1,398	-0,857	0,139	3,9	8,48E+03	

f _g	log E*	E*
[Hz]	psi	Mpa
1,00E+08	4,6	3,94E+04
1,00E+07	4,6	3,81E+04
1,00E+06	4,6	3,63E+04
1,00E+05	4,5	3,39E+04
1,00E+04	4,5	3,08E+04
1,00E+03	4,4	2,70E+04
1,00E+02	4,4	2,24E+04
1,00E+01	4,2	1,74E+04
1,00E+00	4,1	1,24E+04
1,00E-01	3,9	7,88E+03
1,00E-02	3,6	4,40E+03
1,00E-03	3,3	2,11E+03
1,00E-04	2,9	8,77E+02
1,00E-05	2,5	3,20E+02
1,00E-06	2,0	1,07E+02
1,00E-07	1,5	3,51E+01
1,00E-08	1,1	1,20E+01
1,00E-09	0,7	4,51E+00



H_p - Fitting

Reference Temp [C]	20
1ksi =	6,8948 MPa
1psi =	6,8948 kPa
1psi =	0,00689 MPa

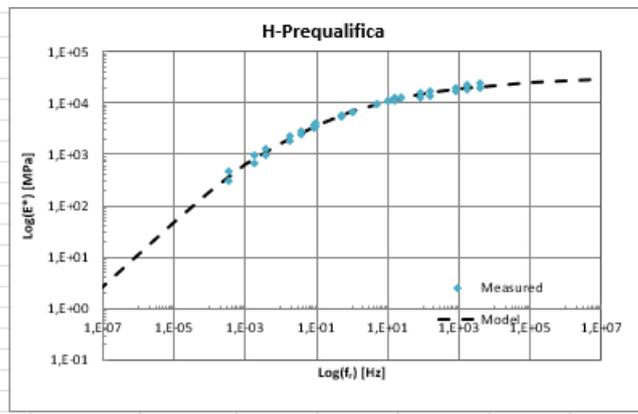
Max	3086107,56	Mpa
max (log)	4,53636958	
P _e	0,85090763	
	mean	
VMA	19,63	
VFA	64,32	
A	4200000	
B	435000	

	Optimized	Initial values
δ	-2,77	0,50
β	-2,2298	-1
γ	-0,35486	-0,5
Log(ΔE _s)	5,332	5,3010
ΔE _s	214767,2	

Least squares: 1.92E+01

	Temperature	Frequency	Modulus	Modulus	Log Modulus	log(a(T))	log f	log f _r	f _r	Log E'	E'
	[C]	[Hz]	psi	Mpa			[Hz]	[Hz]	[Hz]	predicted	predicted
Hp1	4	0,1	1,81E+06	1,25E+04	4,1	2,21E+00	-1,000	1,209	16,178	4,1	1,14E+04
	4	0,5	2,23E+06	1,54E+04	4,2	2,21E+00	-0,301	1,908	80,888	4,2	1,44E+04
	4	1	2,43E+06	1,68E+04	4,2	2,21E+00	0,000	2,209	161,777	4,2	1,56E+04
	4	5	2,93E+06	2,02E+04	4,3	2,21E+00	0,699	2,908	808,884	4,3	1,85E+04
	4	10	3,16E+06	2,18E+04	4,3	2,21E+00	1,000	3,209	1617,767	4,3	1,96E+04
	4	25	3,49E+06	2,41E+04	4,4	2,21E+00	1,398	3,607	4044,419	4,3	2,11E+04
	20	0,1	5,02E+05	3,46E+03	3,5	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,6	3,67E+03
	20	0,5	7,87E+05	5,43E+03	3,7	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	3,8	5,69E+03
	20	1	9,35E+05	6,44E+03	3,8	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	3,8	6,71E+03
	20	5	1,34E+06	9,25E+03	4,0	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,0	9,34E+03
	20	10	1,55E+06	1,07E+04	4,0	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,0	1,06E+04
	20	25	1,84E+06	1,27E+04	4,1	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,1	1,22E+04
	40	0,1	4,50E+04	3,10E+02	2,5	-2,44E+00	-1,000	-3,444	0,000	2,6	3,82E+02
	40	0,5	9,92E+04	6,84E+02	2,8	-2,44E+00	-0,301	-2,745	0,002	2,9	8,24E+02
	40	1	1,37E+05	9,44E+02	3,0	-2,44E+00	0,000	-2,444	0,004	3,0	1,11E+03
	40	5	2,72E+05	1,88E+03	3,3	-2,44E+00	0,699	-1,745	0,018	3,3	2,09E+03
40	10	3,52E+05	2,43E+03	3,4	-2,44E+00	1,000	-1,444	0,036	3,4	2,65E+03	
40	25	4,73E+05	3,26E+03	3,5	-2,44E+00	1,398	-1,046	0,090	3,6	3,55E+03	
H2	4	0,1	1,54E+06	1,06E+04	4,0	2,21E+00	-1,000	1,209	16,178	4,1	1,14E+04
	4	0,5	1,85E+06	1,27E+04	4,1	2,21E+00	-0,301	1,908	80,888	4,2	1,44E+04
	4	1	2,01E+06	1,38E+04	4,1	2,21E+00	0,000	2,209	161,777	4,2	1,56E+04
	4	5	2,42E+06	1,67E+04	4,2	2,21E+00	0,699	2,908	808,884	4,3	1,85E+04
	4	10	2,60E+06	1,79E+04	4,3	2,21E+00	1,000	3,209	1617,767	4,3	1,96E+04
	4	25	2,75E+06	1,90E+04	4,3	2,21E+00	1,398	3,607	4044,419	4,3	2,11E+04
	20	0,1	5,83E+05	4,02E+03	3,6	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,6	3,67E+03
	20	0,5	8,59E+05	5,93E+03	3,8	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	3,8	5,69E+03
	20	1	9,92E+05	6,84E+03	3,8	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	3,8	6,71E+03
	20	5	1,37E+06	9,43E+03	4,0	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,0	9,34E+03
	20	10	1,55E+06	1,07E+04	4,0	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,0	1,06E+04
	20	25	1,80E+06	1,24E+04	4,1	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,1	1,22E+04
	40	0,1	6,86E+04	4,73E+02	2,7	-2,44E+00	-1,000	-3,444	0,000	2,6	3,82E+02
	40	0,5	1,43E+05	9,85E+02	3,0	-2,44E+00	-0,301	-2,745	0,002	2,9	8,24E+02
	40	1	1,89E+05	1,30E+03	3,1	-2,44E+00	0,000	-2,444	0,004	3,0	1,11E+03
	40	5	3,38E+05	2,33E+03	3,4	-2,44E+00	0,699	-1,745	0,018	3,3	2,09E+03
40	10	4,22E+05	2,91E+03	3,5	-2,44E+00	1,000	-1,444	0,036	3,4	2,65E+03	
40	25	5,50E+05	3,79E+03	3,6	-2,44E+00	1,398	-1,046	0,090	3,6	3,55E+03	

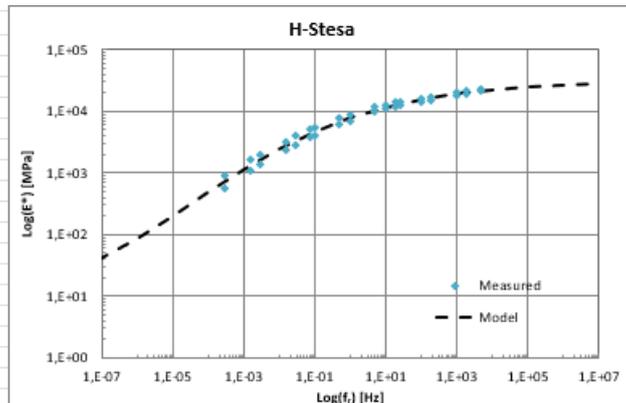
f _r	log E'	E'
[Hz]	Mpa	Mpa
1,00E+08	4,5	3,10E+04
1,00E+07	4,5	2,96E+04
1,00E+06	4,4	2,78E+04
1,00E+05	4,4	2,54E+04
1,00E+04	4,4	2,24E+04
1,00E+03	4,3	1,88E+04
1,00E+02	4,2	1,48E+04
1,00E+01	4,0	1,06E+04
1,00E+00	3,8	6,71E+03
1,00E-01	3,6	3,67E+03
1,00E-02	3,2	1,68E+03
1,00E-03	2,8	6,29E+02
1,00E-04	2,3	1,93E+02
1,00E-05	1,7	5,01E+01
1,00E-06	1,1	1,16E+01
1,00E-07	0,4	2,63E+00
1,00E-08	-0,2	6,34E-01
1,00E-09	-0,8	1,76E-01



H ₂ - Fitting							
Reference Temp [C]	20	Max	3101576,58	Mpa	Optimized	Initial values	
		max (log)	4,48557002		δ	0,57	0,50
1ksi = 6,8948 MPa		P _c	0,85426505		β	-1,7262	-1
1psi = 6,8948 kPa			mean		γ	-0,3932	-0,5
1psi = 0,00689 MPa		VMA	19,64		Log(ΔE _s)	5,346	5,3010
		VFA	67,41		ΔE _s	221759,8	
		A	4200000				
		B	435000				
					Least squares	1,15E-01	

	Temperature [C]	Frequency [Hz]	Modulus	Modulus	Log Modulus	log[a(T)]	log f	log f _r	f _r	Log E* predicted	E* predicted	
			psi	Mpa			[Hz]	[Hz]	[Hz]	psi	psi	
Hs1	4	0,1	1,66E+06	1,15E+04	4,1	2,28E+00	-1,000	1,281	19,091	4,1	1,28E+04	
	4	0,5	2,03E+06	1,40E+04	4,1	2,28E+00	-0,301	1,980	95,457	4,2	1,55E+04	
	4	1	2,21E+06	1,52E+04	4,2	2,28E+00	0,000	2,281	190,913	4,2	1,66E+04	
	4	5	2,64E+06	1,82E+04	4,3	2,28E+00	0,699	2,980	954,566	4,3	1,91E+04	
	4	10	2,82E+06	1,95E+04	4,3	2,28E+00	1,000	3,281	1909,132	4,3	2,01E+04	
	4	25	3,06E+06	2,11E+04	4,3	2,28E+00	1,398	3,679	4772,830	4,3	2,13E+04	
	20	0,1	5,94E+05	4,10E+03	3,6	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,7	4,67E+03	
	20	0,5	8,84E+05	6,09E+03	3,8	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	3,8	6,81E+03	
	20	1	1,03E+06	7,09E+03	3,9	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	3,9	7,85E+03	
	20	5	1,42E+06	9,78E+03	4,0	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,0	1,05E+04	
	20	10	1,61E+06	1,11E+04	4,0	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,1	1,16E+04	
	20	25	1,86E+06	1,29E+04	4,1	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,1	1,32E+04	
	40	0,1	8,31E+04	5,73E+02	2,8	-2,52E+00	-1,000	-3,523	0,000	2,9	7,24E+02	
	40	0,5	1,53E+05	1,06E+03	3,0	-2,52E+00	-0,301	-2,824	0,001	3,1	1,30E+03	
	40	1	1,94E+05	1,34E+03	3,1	-2,52E+00	0,000	-2,523	0,003	3,2	1,65E+03	
	40	5	3,32E+05	2,29E+03	3,4	-2,52E+00	0,699	-1,824	0,015	3,4	2,76E+03	
	40	10	4,13E+05	2,85E+03	3,5	-2,52E+00	1,000	-1,523	0,030	3,5	3,38E+03	
	40	25	5,45E+05	3,76E+03	3,6	-2,52E+00	1,398	-1,125	0,075	3,6	4,34E+03	
	Hs2	4	0,1	2,00E+06	1,38E+04	4,1	2,28E+00	-1,000	1,281	19,091	4,1	1,28E+04
		4	0,5	2,31E+06	1,59E+04	4,2	2,28E+00	-0,301	1,980	95,457	4,2	1,55E+04
4		1	2,46E+06	1,70E+04	4,2	2,28E+00	0,000	2,281	190,913	4,2	1,66E+04	
4		5	2,87E+06	1,98E+04	4,3	2,28E+00	0,699	2,980	954,566	4,3	1,91E+04	
4		10	3,03E+06	2,09E+04	4,3	2,28E+00	1,000	3,281	1909,132	4,3	2,01E+04	
4		25	3,28E+06	2,26E+04	4,4	2,28E+00	1,398	3,679	4772,830	4,3	2,13E+04	
20		0,1	8,01E+05	5,52E+03	3,7	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,7	4,67E+03	
20		0,5	1,11E+06	7,67E+03	3,9	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	3,8	6,81E+03	
20		1	1,26E+06	8,70E+03	3,9	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	3,9	7,85E+03	
20		5	1,66E+06	1,15E+04	4,1	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,0	1,05E+04	
20		10	1,86E+06	1,28E+04	4,1	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,1	1,16E+04	
20		25	2,09E+06	1,44E+04	4,2	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,1	1,32E+04	
40		0,1	1,34E+05	9,22E+02	3,0	-2,52E+00	-1,000	-3,523	0,000	2,9	7,24E+02	
40		0,5	2,37E+05	1,63E+03	3,2	-2,52E+00	-0,301	-2,824	0,001	3,1	1,30E+03	
40		1	2,88E+05	1,99E+03	3,3	-2,52E+00	0,000	-2,523	0,003	3,2	1,65E+03	
40		5	4,68E+05	3,23E+03	3,5	-2,52E+00	0,699	-1,824	0,015	3,4	2,76E+03	
40		10	5,67E+05	3,91E+03	3,6	-2,52E+00	1,000	-1,523	0,030	3,5	3,38E+03	
40		25	7,21E+05	4,97E+03	3,7	-2,52E+00	1,398	-1,125	0,075	3,6	4,34E+03	

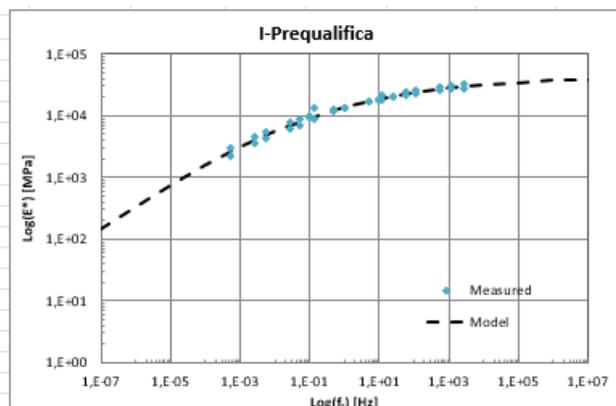
f _r [Hz]	log E* Mpa	E* Mpa
1,00E+08	4,5	2,86E+04
1,00E+07	4,4	2,76E+04
1,00E+06	4,4	2,64E+04
1,00E+05	4,4	2,46E+04
1,00E+04	4,3	2,22E+04
1,00E+03	4,3	1,92E+04
1,00E+02	4,2	1,56E+04
1,00E+01	4,1	1,16E+04
1,00E+00	3,9	7,85E+03
1,00E-01	3,7	4,67E+03
1,00E-02	3,4	2,44E+03
1,00E-03	3,1	1,13E+03
1,00E-04	2,7	4,78E+02
1,00E-05	2,3	1,98E+02
1,00E-06	1,9	8,53E+01
1,00E-07	1,6	4,04E+01
1,00E-08	1,3	2,17E+01
1,00E-09	1,1	1,33E+01



I _p - Fitting			
Reference Temp [C]	20		
1ksi = 6,8948 MPa		Max 3147790,6 Mpa	
1psi = 6,8948 kPa		max (log) 4,6367703	
1psi = 0,00689 MPa		P _e 0,8509666	
		mean	
		VMA 17,63	
		VFA 57,83	
		A 4200000	
		B 435000	
			Optimized Initial values
			δ 0,67 0,50
			β -1,3544 -1
			γ -0,3442 -0,5
			Log(ΔE _g) 5,301 5,3010
			ΔE _g 200121,7
			Least squares: 6,63E-02

	Temperature [C]	Frequency [Hz]	Modulus psi	Modulus Mpa	Log Modulus	log(a(T))	log f	log f _p	f _p [Hz]	Log(E') predicted	E' predicted	
I _{p1}	4	0,1	3,04E+06	2,09E+04	4,3	2,06E+00	-1,000	1,058	11,436	4,3	1,89E+04	
	4	0,5	3,48E+06	2,40E+04	4,4	2,06E+00	-0,301	1,757	57,181	4,3	2,23E+04	
	4	1	3,67E+06	2,53E+04	4,4	2,06E+00	0,000	2,058	114,363	4,4	2,37E+04	
	4	5	4,16E+06	2,87E+04	4,5	2,06E+00	0,699	2,757	571,814	4,4	2,68E+04	
	4	10	4,37E+06	3,02E+04	4,5	2,06E+00	1,000	3,058	1143,629	4,4	2,80E+04	
	4	25	4,71E+06	3,25E+04	4,5	2,06E+00	1,398	3,456	2859,072	4,5	2,96E+04	
	20	0,1	1,41E+06	9,70E+03	4,0	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	4,0	9,26E+03	
	20	0,5	1,80E+06	1,24E+04	4,1	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	4,1	1,23E+04	
	20	1	1,99E+06	1,37E+04	4,1	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	4,1	1,37E+04	
	20	5	2,44E+06	1,68E+04	4,2	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,2	1,71E+04	
	20	10	2,65E+06	1,83E+04	4,3	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,3	1,86E+04	
	20	25	2,99E+06	2,06E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,3	2,06E+04	
	40	0,1	4,35E+05	3,00E+03	3,5	-2,28E+00	-1,000	-3,277	0,001	3,4	2,58E+03	
	40	0,5	6,58E+05	4,54E+03	3,7	-2,28E+00	-0,301	-2,578	0,003	3,6	4,05E+03	
	40	1	7,76E+05	5,35E+03	3,7	-2,28E+00	0,000	-2,277	0,005	3,7	4,84E+03	
	40	5	1,10E+06	7,60E+03	3,9	-2,28E+00	0,699	-1,578	0,026	3,8	7,05E+03	
	40	10	1,29E+06	8,87E+03	3,9	-2,28E+00	1,000	-1,277	0,053	3,9	8,16E+03	
	40	25	1,98E+06	1,37E+04	4,1	-2,28E+00	1,398	-0,879	0,132	4,0	9,77E+03	
	I _{p2}	4	0,1	2,65E+06	1,83E+04	4,3	2,06E+00	-1,000	1,058	11,436	4,3	1,89E+04
		4	0,5	3,03E+06	2,09E+04	4,3	2,06E+00	-0,301	1,757	57,181	4,3	2,23E+04
4		1	3,22E+06	2,22E+04	4,3	2,06E+00	0,000	2,058	114,363	4,4	2,37E+04	
4		5	3,66E+06	2,53E+04	4,4	2,06E+00	0,699	2,757	571,814	4,4	2,68E+04	
4		10	3,84E+06	2,65E+04	4,4	2,06E+00	1,000	3,058	1143,629	4,4	2,80E+04	
4		25	3,87E+06	2,67E+04	4,4	2,06E+00	1,398	3,456	2859,072	4,5	2,96E+04	
20		0,1	1,33E+06	9,19E+03	4,0	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	4,0	9,26E+03	
20		0,5	1,73E+06	1,19E+04	4,1	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	4,1	1,23E+04	
20		1	1,91E+06	1,32E+04	4,1	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	4,1	1,37E+04	
20		5	2,38E+06	1,64E+04	4,2	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,2	1,71E+04	
20		10	2,61E+06	1,80E+04	4,3	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,3	1,86E+04	
20		25	2,91E+06	2,01E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,3	2,06E+04	
40		0,1	3,30E+05	2,28E+03	3,4	-2,28E+00	-1,000	-3,277	0,001	3,4	2,58E+03	
40		0,5	5,20E+05	3,59E+03	3,6	-2,28E+00	-0,301	-2,578	0,003	3,6	4,05E+03	
40		1	6,11E+05	4,21E+03	3,6	-2,28E+00	0,000	-2,277	0,005	3,7	4,84E+03	
40		5	8,91E+05	6,14E+03	3,8	-2,28E+00	0,699	-1,578	0,026	3,8	7,05E+03	
40		10	1,03E+06	7,10E+03	3,9	-2,28E+00	1,000	-1,277	0,053	3,9	8,16E+03	
40		25	1,24E+06	8,58E+03	3,9	-2,28E+00	1,398	-0,879	0,132	4,0	9,77E+03	

f _p [Hz]	log(E') Mpa	E' Mpa
1,00E+08	4,6	3,99E+04
1,00E+07	4,6	3,86E+04
1,00E+06	4,6	3,68E+04
1,00E+05	4,5	3,45E+04
1,00E+04	4,5	3,15E+04
1,00E+03	4,4	2,78E+04
1,00E+02	4,4	2,34E+04
1,00E+01	4,3	1,86E+04
1,00E+00	4,1	1,37E+04
1,00E-01	4,0	9,26E+03
1,00E-02	3,8	5,65E+03
1,00E-03	3,5	3,10E+03
1,00E-04	3,2	1,55E+03
1,00E-05	2,9	7,23E+02
1,00E-06	2,5	3,27E+02
1,00E-07	2,2	1,50E+02
1,00E-08	1,9	7,28E+01
1,00E-09	1,6	3,86E+01

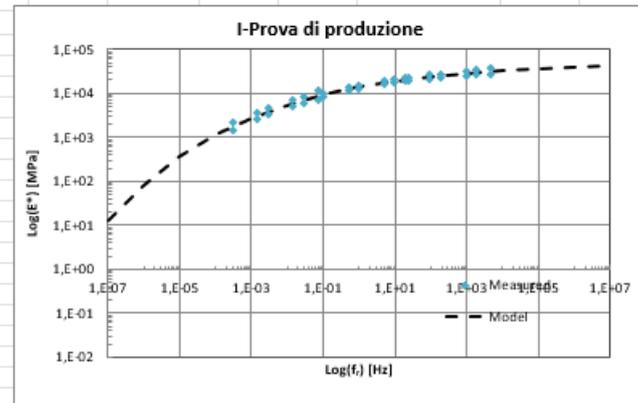


I_c - Fitting

Reference Temp [°C]	20	Max	3323598	Mpa		Optimized	Initial values
		max (log)	4,69742			δ	0,59
1ksi =	6,8948 MPa	P _c	0,87183			β	-1
1psi =	6,8948 kPa		mean			γ	-0,5
1psi =	0,0069 MPa	VMA	15,15			Log(ΔE_s)	5,3010
		VFA	67,17			ΔE_s	222575,6
		A	4200000				
		B	435000				
					Least squares		1,22E-01

	Temperature	Frequency	Modulus	Modulus	Log Modulus	log(a(T))	log f	log f _r	f _r	Log E' predicted	E' predicted
	[°C]	[Hz]	psi	Mpa			[Hz]	[Hz]	[Hz]	psi	psi
Ic1	4	0,1	3,21E+06	2,21E+04	4,3	2,29E+00	-1,000	1,289	19,464	4,3	2,01E+04
	4	0,5	3,75E+06	2,59E+04	4,4	2,29E+00	-0,301	1,988	97,319	4,4	2,36E+04
	4	1	3,98E+06	2,75E+04	4,4	2,29E+00	0,000	2,289	194,638	4,4	2,50E+04
	4	5	4,57E+06	3,15E+04	4,5	2,29E+00	0,699	2,988	973,189	4,5	2,82E+04
	4	10	4,79E+06	3,31E+04	4,5	2,29E+00	1,000	3,289	1946,379	4,5	2,95E+04
	4	25	5,57E+06	3,84E+04	4,6	2,29E+00	1,398	3,687	4865,947	4,5	3,12E+04
	20	0,1	1,45E+06	9,99E+03	4,0	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	4,0	9,17E+03
	20	0,5	1,91E+06	1,32E+04	4,1	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	4,1	1,23E+04
	20	1	2,13E+06	1,47E+04	4,2	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	4,1	1,37E+04
	20	5	2,67E+06	1,84E+04	4,3	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,2	1,72E+04
	20	10	2,92E+06	2,01E+04	4,3	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,3	1,87E+04
	20	25	3,23E+06	2,23E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,3	2,07E+04
	40	0,1	3,12E+05	2,15E+03	3,3	-2,53E+00	-1,000	-3,533	0,000	3,2	1,74E+03
	40	0,5	5,30E+05	3,66E+03	3,6	-2,53E+00	-0,301	-2,834	0,001	3,5	3,09E+03
	40	1	6,54E+05	4,51E+03	3,7	-2,53E+00	0,000	-2,533	0,003	3,6	3,84E+03
	40	5	9,97E+05	6,88E+03	3,8	-2,53E+00	0,699	-1,834	0,015	3,8	5,97E+03
40	10	1,19E+06	8,21E+03	3,9	-2,53E+00	1,000	-1,533	0,029	3,8	7,04E+03	
40	25	1,61E+06	1,11E+04	4,0	-2,53E+00	1,398	-1,135	0,073	3,9	8,61E+03	
Ic2	4	0,1	2,76E+06	1,90E+04	4,3	2,29E+00	-1,000	1,289	19,464	4,3	2,01E+04
	4	0,5	3,10E+06	2,14E+04	4,3	2,29E+00	-0,301	1,988	97,319	4,4	2,36E+04
	4	1	3,25E+06	2,24E+04	4,4	2,29E+00	0,000	2,289	194,638	4,4	2,50E+04
	4	5	3,62E+06	2,50E+04	4,4	2,29E+00	0,699	2,988	973,189	4,5	2,82E+04
	4	10	3,75E+06	2,58E+04	4,4	2,29E+00	1,000	3,289	1946,379	4,5	2,95E+04
	4	25	3,91E+06	2,69E+04	4,4	2,29E+00	1,398	3,687	4865,947	4,5	3,12E+04
	20	0,1	1,25E+06	8,63E+03	3,9	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	4,0	9,17E+03
	20	0,5	1,66E+06	1,15E+04	4,1	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	4,1	1,23E+04
	20	1	1,83E+06	1,26E+04	4,1	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	4,1	1,37E+04
	20	5	2,30E+06	1,58E+04	4,2	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,2	1,72E+04
	20	10	2,48E+06	1,71E+04	4,2	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,3	1,87E+04
	20	25	2,69E+06	1,85E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,3	2,07E+04
	40	0,1	2,08E+05	1,43E+03	3,2	-2,53E+00	-1,000	-3,533	0,000	3,2	1,74E+03
	40	0,5	3,74E+05	2,58E+03	3,4	-2,53E+00	-0,301	-2,834	0,001	3,5	3,09E+03
	40	1	4,59E+05	3,17E+03	3,5	-2,53E+00	0,000	-2,533	0,003	3,6	3,84E+03
	40	5	7,41E+05	5,11E+03	3,7	-2,53E+00	0,699	-1,834	0,015	3,8	5,97E+03
40	10	8,69E+05	5,99E+03	3,8	-2,53E+00	1,000	-1,533	0,029	3,8	7,04E+03	
40	25	1,04E+06	7,20E+03	3,9	-2,53E+00	1,398	-1,135	0,073	3,9	8,61E+03	

f _r	log E'	E'
[Hz]	Mpa	Mpa
1,00E+08	4,6	4,32E+04
1,00E+07	4,6	4,13E+04
1,00E+06	4,6	3,89E+04
1,00E+05	4,6	3,60E+04
1,00E+04	4,5	3,24E+04
1,00E+03	4,5	2,83E+04
1,00E+02	4,4	2,37E+04
1,00E+01	4,3	1,87E+04
1,00E+00	4,1	1,37E+04
1,00E-01	4,0	9,17E+03
1,00E-02	3,7	5,41E+03
1,00E-03	3,4	2,72E+03
1,00E-04	3,0	1,12E+03
1,00E-05	2,5	3,54E+02
1,00E-06	1,9	8,14E+01
1,00E-07	1,1	1,26E+01
1,00E-08	0,1	1,20E+00
1,00E-09	-1,2	6,58E-02



C _p - Fitting									
Reference Temp [C]	20								
1ksi =	6,8948	MPa	Max	3321385	Mpa	Optimized	Initial values		
1psi =	6,8948	kPa	max (log)	4,37705		δ	2,29	0,50	
1psi =	0,00689	MPa	P _c	0,876		β	-1,321	-1	
			mean			γ	-0,8	-0,5	
			VMA	15,87		Log(ΔE ₀)	5,297	5,3010	
			VFA	75,15		ΔE ₀	198209,4		
			A	4200000					
			B	435000					
Least squares 1,08E+00									

	Temperature [C]	Frequency [Hz]	Modulus	Modulus	Log Modulus	log[a(T)]	log f	log f _r	f _r	Log E' predicted	E' predicted
			psi	Mpa			[Hz]	[Hz]	[Hz]	psi	psi
Cr1	4	0,1	2,30E+06	1,59E+04	4,2	2,04E+00	-1,000	1,039	10,930	4,2	1,44E+04
	4	0,5	2,89E+06	1,99E+04	4,3	2,04E+00	-0,301	1,738	54,650	4,2	1,77E+04
	4	1	3,17E+06	2,19E+04	4,3	2,04E+00	0,000	2,039	109,299	4,3	1,88E+04
	4	5	3,95E+06	2,73E+04	4,4	2,04E+00	0,699	2,738	546,495	4,3	2,07E+04
	4	10	4,31E+06	2,97E+04	4,5	2,04E+00	1,000	3,039	1092,990	4,3	2,13E+04
	4	25	5,67E+06	3,91E+04	4,6	2,04E+00	1,398	3,437	2732,476	4,3	2,20E+04
	20	0,1	8,37E+05	5,77E+03	3,8	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,6	3,98E+03
	20	0,5	1,26E+06	8,71E+03	3,9	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	3,8	7,05E+03
	20	1	1,49E+06	1,02E+04	4,0	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	3,9	8,66E+03
	20	5	2,09E+06	1,44E+04	4,2	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,1	1,26E+04
	20	10	2,41E+06	1,66E+04	4,2	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,2	1,42E+04
	20	25	2,85E+06	1,96E+04	4,3	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,2	1,62E+04
	40	0,1	1,29E+05	8,92E+02	3,0	-2,26E+00	-1,000	-3,255	0,001	2,7	5,55E+02
	40	0,5	2,41E+05	1,66E+03	3,2	-2,26E+00	-0,301	-2,556	0,003	3,0	9,38E+02
	40	1	3,10E+04	2,14E+02	2,3	-2,26E+00	0,000	-2,255	0,006	3,1	1,22E+03
	40	5	5,42E+05	3,74E+03	3,6	-2,26E+00	0,699	-1,556	0,028	3,4	2,36E+03
40	10	6,76E+05	4,66E+03	3,7	-2,26E+00	1,000	-1,255	0,056	3,5	3,15E+03	
40	25	8,88E+05	6,12E+03	3,8	-2,26E+00	1,398	-0,857	0,139	3,7	4,51E+03	
Cr2	4	0,1	1,57E+06	1,09E+04	4,0	2,04E+00	-1,000	1,039	10,930	4,2	1,44E+04
	4	0,5	1,88E+06	1,30E+04	4,1	2,04E+00	-0,301	1,738	54,650	4,2	1,77E+04
	4	1	2,02E+06	1,39E+04	4,1	2,04E+00	0,000	2,039	109,299	4,3	1,88E+04
	4	5	2,37E+06	1,64E+04	4,2	2,04E+00	0,699	2,738	546,495	4,3	2,07E+04
	4	10	2,51E+06	1,73E+04	4,2	2,04E+00	1,000	3,039	1092,990	4,3	2,13E+04
	4	25	2,63E+06	1,81E+04	4,3	2,04E+00	1,398	3,437	2732,476	4,3	2,20E+04
	20	0,1	5,85E+05	4,04E+03	3,6	0,00E+00	-1,000	-1,000	0,100	3,6	3,98E+03
	20	0,5	8,56E+05	5,90E+03	3,8	0,00E+00	-0,301	-0,301	0,500	3,8	7,05E+03
	20	1	9,94E+05	6,85E+03	3,8	0,00E+00	0,000	0,000	1,000	3,9	8,66E+03
	20	5	1,37E+06	9,45E+03	4,0	0,00E+00	0,699	0,699	5,000	4,1	1,26E+04
	20	10	1,54E+06	1,06E+04	4,0	0,00E+00	1,000	1,000	10,000	4,2	1,42E+04
	20	25	1,82E+06	1,26E+04	4,1	0,00E+00	1,398	1,398	25,000	4,2	1,62E+04
	40	0,1	6,71E+04	4,62E+02	2,7	-2,26E+00	-1,000	-3,255	0,001	2,7	5,55E+02
	40	0,5	1,39E+05	9,61E+02	3,0	-2,26E+00	-0,301	-2,556	0,003	3,0	9,38E+02
	40	1	1,82E+05	1,26E+03	3,1	-2,26E+00	0,000	-2,255	0,006	3,1	1,22E+03
	40	5	3,28E+05	2,26E+03	3,4	-2,26E+00	0,699	-1,556	0,028	3,4	2,36E+03
40	10	4,11E+05	2,84E+03	3,5	-2,26E+00	1,000	-1,255	0,056	3,5	3,15E+03	
40	25	5,43E+05	3,75E+03	3,6	-2,26E+00	1,398	-0,857	0,139	3,7	4,51E+03	

f _r	log E'	E'
[Hz]	Mpa	Mpa
1,00E+08	4,4	2,38E+04
1,00E+07	4,4	2,37E+04
1,00E+06	4,4	2,36E+04
1,00E+05	4,4	2,33E+04
1,00E+04	4,4	2,26E+04
1,00E+03	4,3	2,13E+04
1,00E+02	4,3	1,86E+04
1,00E+01	4,2	1,42E+04
1,00E+00	3,9	8,66E+03
1,00E-01	3,6	3,98E+03
1,00E-02	3,2	1,55E+03
1,00E-03	2,8	6,62E+02
1,00E-04	2,6	3,70E+02
1,00E-05	2,4	2,67E+02
1,00E-06	2,4	2,26E+02
1,00E-07	2,3	2,09E+02
1,00E-08	2,3	2,02E+02
1,00E-09	2,3	1,99E+02

