



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.a. 2022/2023

***Analisi sperimentale di conglomerati
bituminosi contenenti polimeri prodotti
con tecnologia “wet” e “dry”.***

Relatori:

Prof. Davide Dalmazzo

Prof. Pier Paolo Riviera

Prof. Ezio Santagata

Candidato:

Lorenzo Bevilacqua

Abstract

Per far fronte a specifiche esigenze progettuali e per compensare la minor qualità dei bitumi tal quali oggi presenti sul mercato, l'utilizzo di polimeri a natura elastomerica o plastomerica consente di migliorare le proprietà meccaniche e di resistenza ai principali fenomeni di degrado delle miscele bituminose con essi prodotti.

L'aggiunta dei polimeri, oltre che di eventuali additivi, può avvenire secondo due differenti tecnologie, comunemente denominate "wet" e "dry". Nella tradizionale tecnologia "wet", i polimeri vengono miscelati direttamente col bitume tal quale, in un ambiente controllato, ottenendo bitumi modificati (PMB) ad elevate prestazioni. Tra i principali svantaggi di questa tecnologia si segnala la necessità di un impianto specializzato per la loro produzione, attrezzature specifiche per il trasporto e lo stoccaggio, problemi di instabilità e disomogeneità nel tempo. In alternativa, si sta sempre più diffondendo la pratica di aggiungere i polimeri direttamente nell'impianto di produzione dei conglomerati bituminosi. In questo caso, i polimeri non vengono premiscelati con il bitume ma aggiunti direttamente nel miscelatore insieme agli aggregati e al bitume tal quale, sviluppando però differenti reazioni rispetto ai PMB. Tale metodo, noto come tecnologia "dry", può essere facilmente implementato negli impianti di produzione riducendo i costi di produzione e di trasporto e presenta il grande vantaggio di poter preventivamente stoccare il polimero e il bitume tal quale senza problemi di instabilità o degrado nel tempo. La maggiore criticità riguarda le prestazioni dei conglomerati bituminosi così prodotti, che risultano di più difficile valutazione rispetto a quelle delle miscele contenenti PMB. I controlli di qualità vengono, infatti, eseguiti esclusivamente sulle miscele finali e prevedono prove che non sempre rispecchiano le reali caratteristiche prestazionali e di durabilità delle miscele investigate.

In questo contesto si inserisce il presente elaborato di tesi, il quale si pone l'obiettivo di valutare in maniera critica le caratteristiche volumetriche, di addensamento e meccaniche di miscele bituminose prodotte con le due tecnologie. In particolare, lo studio si è concentrato sull'analisi di quattro differenti miscele bituminose modificate con polimeri, due realizzate attraverso l'impiego della procedura denominata "wet" e due secondo quella "dry".

Le prestazioni indagate hanno avuto come oggetto la valutazione della resistenza a rottura per trazione indiretta, delle caratteristiche viscoelastiche attraverso la determinazione del modulo complesso E^* e angolo di fase δ , della resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti mediante prove di flow number e della resistenza alla rottura per fatica.

Al fine di evidenziare ed esaltare le possibili differenze tra le due tecnologie, "wet" e "dry", le prove sono state condotte in differenti condizioni di temperatura, addensamento, velocità di applicazione del carico e scenario di condizionamento.

I risultati ottenuti dimostrano come entrambe le tecnologie consentano di realizzare miscele di qualità che soddisfano ai requisiti normalmente richiesti dalle norme tecniche e dai capitolati speciali d'appalto. In generale, tra le miscele investigate non si sono evidenziate differenze sostanziali in termini di caratteristiche di addensamento, volumetria e resistenza meccanica. La tecnologia "wet" sembrerebbe comunque garantire prestazioni superiori per quanto riguarda la resistenza alla fatica.

Abstract

In order to meet specific design requirements and to eventually compensate for the low quality of neat bitumens, the use of elastomeric or plastomeric polymers allows to improve the mechanical properties and resistance to the main degradation phenomena of bituminous mixtures produced with them.

The addition of polymers, as well as any additives, can take place according to two different technologies, commonly referred to as "wet" and "dry." In "wet" technology, the polymers are mixed directly with the neat bitumen, in a controlled process, resulting in a high-performance modified binder (PMB). The main disadvantages of this technology include the need for a specialized plant for their production, specific equipment for transportation and storage, problems of instability and inhomogeneity over time. Alternatively, the practice of adding polymers directly into the bituminous mixtures production plant is becoming increasingly popular. In this case, the polymers are not premixed with bitumen but added directly into the mixer along with the aggregates and neat bitumen, however, developing different reactions than PMBs. This method, known as "dry" technology, can be easily implemented in production plants by reducing production and transportation costs and has the great advantage of being able to pre-store the polymer and neat bitumen without problems of instability or degradation in the course of time. The major critical issue concerns the performance of bituminous mixtures produced in this way, which is more difficult to evaluate than that of mixtures containing PMBs. Quality controls are, in fact, carried out exclusively on the final mixtures and involve tests that do not always reflect the real performance and durability characteristics of the mixtures investigated.

This is the context for the present thesis paper, which aims to critically evaluate the volumetric, compaction and mechanical characteristics of bituminous mixtures produced with the two technologies. Specifically, the study focused on the analysis of four different polymer-modified bituminous mixtures, two made through the use of the procedure called "wet" and two according to the "dry" one.

The investigated performances were concerned with the evaluation of indirect tensile strength, viscoelastic characteristics through the determination of complex modulus E^* and phase angle

δ , resistance to the accumulation of permanent deformations by flow number tests, and fatigue fracture strength.

In order to highlight the possible differences between the two technologies, "wet" and "dry", tests were conducted under different conditions of temperature, compaction, rate of load application and conditioning scenario.

The results obtained show that both technologies enable the production of quality mixtures that meet the requirements normally demanded by technical standards. In general, no substantial differences in terms of compaction, volume and mechanical strength were highlighted among the investigated mixtures. However, the "wet" technology would appear to provide superior performance in terms of fatigue strength.

Indice

Introduzione.....	8
1. Conglomerati bituminosi contenenti polimeri	12
1.1. Tecnologia di addizione “wet”	17
1.2. Tecnologia di addizione “dry”	19
2. Programma sperimentale.....	21
3. Caratterizzazione compositiva	23
3.1. Realizzazione nuova miscela	23
3.2. Massima massa volumica teorica (MMVT).....	27
3.3. Contenuto di legante	32
3.4. Analisi granulometrica.....	36
3.5. Compattazione con pressa a taglio giratorio	40
3.6. Massa volumica	47
3.7. Scenari di condizionamento a lungo termine	49
4. Caratterizzazione meccanica	52
4.1. Resistenza a trazione indiretta (ITS)	52
4.2. Resistenza a fatica	57
4.3. Modulo dinamico.....	64
4.3.1. Preparazione dei campioni.....	65
4.3.2. Esecuzione della prova	71
4.4. Flow number	77
5. Analisi dei dati	82
5.1. Analisi delle caratteristiche compositive e volumetriche	82
5.1.1. Analisi del contenuto di legante.....	82
5.1.2. Analisi granulometrica.....	84
5.1.3. Analisi MMVT.....	88
5.1.4. Compattazione con pressa a taglio giratorio	90
5.2. Analisi delle caratteristiche meccaniche.....	96
5.2.1. Analisi di resistenza a trazione indiretta.....	96
5.2.2. Analisi di resistenza a fatica	108
5.2.3. Curve maestre	112
5.2.4. Flow number	117
6. Conclusioni.....	120
7. Bibliografia	122
8. Allegati	125

8.1. Allegato A: Resistenza a fatica	125
8.2. Allegato B: Modulo dinamico.....	129

Introduzione

Le pavimentazioni stradali ed aeroportuali di tipo flessibile sono costruite mediante l'impiego dei conglomerati bituminosi, realizzati miscelando opportunamente aggregati lapidei e leganti a matrice bituminosa, tra cui il bitume risulta essere il più utilizzato.

Il comportamento tenso deformativo sotto carico di questa tipologia di pavimentazioni dipende essenzialmente dalle caratteristiche reologiche del legante bituminoso utilizzato che, se adeguatamente selezionato, conferisce appropriate prestazioni strutturali e funzionali all'infrastruttura.

Il bitume deriva principalmente dal processo di distillazione frazionata del petrolio allo stato naturale, ed è effettuata nelle raffinerie, strutture industriali molto complesse.

Nell'impianto di distillazione il greggio, riscaldato fino a 350 °C circa, viene introdotto nella parte inferiore della colonna, a pressione ambiente. La colonna di distillazione è costituita da una serie di piatti, dotati di una particolare struttura a campanelle per favorire lo scambio di calore tra il vapore che sale gorgogliando e il liquido che scende. I piatti sono mantenuti a temperature decrescenti verso l'alto e su ciascun piatto condensano i componenti che hanno temperature di ebollizione prossime alla temperatura del piatto stesso, determinando così il frazionamento voluto (figura 1).

La frazione più pesante del greggio che non raggiunge la temperatura di ebollizione si raccoglie sul fondo della colonna e costituisce il residuo semisolido, ad alta viscosità, detto bitume. Nell'industria petrolifera le componenti leggere sono quelle più redditizie, ovvero le componenti con cui otteniamo GPL, benzina, cherosene e gasolio [1].

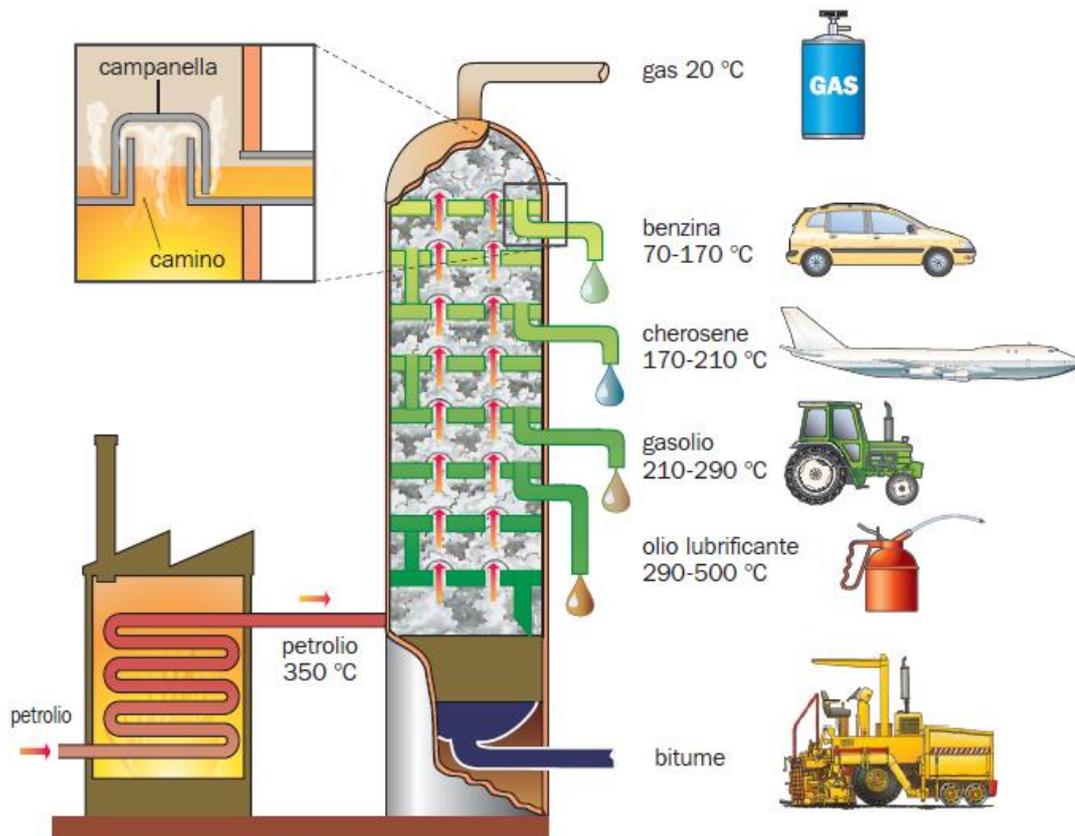


Figura 1 Schema di raffinazione del greggio, Zanichelli Editore

"Dai miscugli alle sostanze" Bagatti Et al.

Questa priorità economica nel corso degli anni ha prodotto una minore attenzione verso la qualità del bitume così prodotto, che pertanto potrebbe non presentare caratteristiche idonee al fine di ottenere pavimentazioni di prestazioni elevate soprattutto alla luce delle problematiche inerenti al fenomeno del Climat Change. Infatti, questo tema che sempre di più viene discusso, è la causa di temperature estreme che obbligano le infrastrutture ad aumentare le prestazioni in termini di resistenza alle temperature.

Inoltre, sappiamo bene che i volumi di traffico negli ultimi 20 anni sono aumentati a dismisura, in alcune parti del mondo altamente urbanizzate la percentuale è aumentata addirittura più del tasso di crescita della popolazione [2].

Per ovviare a tutti i problemi descritti, sono stati studiati e sviluppati i leganti bituminosi modificati.

Questi materiali sono il risultato della miscelazione di bitume con polimeri o altri additivi, che vengono aggiunti per migliorare le prestazioni dei leganti bituminosi.

L'utilizzo di polimeri rappresenta una pratica consolidata nell'industria stradale, in quanto capace di migliorare le proprietà meccaniche e reologiche dei conglomerati bituminosi, aumentando la loro resistenza termica e migliorando la stabilità alle deformazioni permanenti. Inoltre, essi riducono l'usura e l'erosione, aumentando la vita utile della pavimentazione.

I polimeri più comunemente addizionati sono lo Stirene-Butadiene-Stirene (SBS), Acrilonitrile-Butadiene-Stirene (ABS), Etilene-Vinil-Acetano (EVA) o Etilene-Butil-Acricato (EBA), e negli ultimi anni si è registrato un aumento nell'utilizzo di gomma da pneumatici fuori uso (PFU) [3].

Il processo di addizione dei polimeri nel conglomerato bituminoso può avvenire tramite diverse tecniche. La tecnica più comune è denominata "wet", in cui il polimero viene aggiunto direttamente nel bitume tal quale in uno specifico processo di miscelazione, che impiega solitamente temperature elevate e diverse energie di miscelazione per ottenere la giusta reazione tra legante ed additivo. Successivamente, il legante modificato viene miscelato con gli aggregati per ottenere il conglomerato bituminoso finale.

Un'altra tecnologia di addizione, meno estesa, è la modalità "dry". Essa prevede la miscelazione contemporanea di bitume tal quale, polimeri e aggregati in un unico passaggio nel tamburo del miscelatore, risultando meno onerosa ma non avendo sotto controllo l'omogeneità della reazione legante-polimero [4].

Entrambe le modalità di addizione presentano vantaggi e svantaggi, tuttavia, non è ancora del tutto chiaro quale delle due tipologie di addizione sia la più efficace in termini di prestazioni e durabilità.

Il programma sperimentale di questo elaborato di tesi ha come obiettivo l'analisi e il confronto di miscele bituminose prodotte con queste due tecnologie di addizione dei polimeri, e si sviluppa in tre fasi principali:

- La prima fase consiste nella caratterizzazione compositiva e volumetrica dei conglomerati bituminosi, in cui vengono descritte le procedure ed i vari strumenti utilizzati al fine di determinare le caratteristiche intrinseche delle miscele.

- Nella seconda fase vi è la caratterizzazione meccanica e prestazionale delle miscele realizzate secondo le due tecnologie di addizione. Le prove meccaniche includono test di resistenza alla trazione indiretta, test di fatica, test per la determinazione del modulo dinamico ed infine test per determinare le deformazioni permanenti, al fine di valutare le miscele sotto differenti condizioni di carico.
- Infine, nella terza fase, i dati ottenuti dalle due caratterizzazioni precedenti vengono analizzati e confrontati, al fine di determinare quale dei due metodi di addizione porti ad ottenere le migliori prestazioni. In particolare, sono state utilizzate tecniche di analisi indirizzate a determinare la significatività dei risultati e per stabilire eventuali correlazioni tra le proprietà meccaniche dei materiali e le loro caratteristiche compositive e volumetriche.

In sintesi, questa ricerca si propone di fornire un contributo significativo alla comprensione delle prestazioni dei conglomerati bituminosi in relazione alla tecnologia di addizione utilizzata.

I risultati di questo studio potranno avere importanti implicazioni in termini di design di pavimentazioni stradali più resistenti e sostenibili nel tempo.

1. Conglomerati bituminosi contenenti polimeri

La produzione di pavimentazioni stradali e di altri tipi di superfici ad uso civile ed industriale richiede l'utilizzo di materiali altamente performanti e duraturi, in grado di garantire elevata resistenza agli agenti atmosferici e chimici, alle sollecitazioni meccaniche e all'usura dovuta dall'utilizzo continuo. Tra questi materiali i conglomerati bituminosi contenenti polimeri rappresentano una soluzione consolidata e ampiamente utilizzata, grazie alla loro capacità di adattarsi alle diverse esigenze e condizioni ambientali [5].

I conglomerati realizzati con bitume modificato sono materiali compositi costituiti da: bitume, che ha la funzione di legante, polimeri, che ne variano le caratteristiche meccaniche, aggregati minerali che ne costituiscono lo scheletro litico. Questi conglomerati, così composti, vengono realizzati ampiamente in tutto il mondo per la realizzazione di svariate tipologie di pavimentazioni.

Il bitume è un materiale che può essere ottenuto dalla raffinazione del petrolio grezzo o da fonti naturali, come il catrame di carbone. Quest'ultimo, impiegato tal quale per la realizzazione di miscele ha alcune limitazioni, tra cui una scarsa resistenza alle deformazioni permanenti risultando, inoltre, molto sensibile alla fragilità a basse temperature [6].

Per superare queste ed altre limitazioni sono state sviluppate diverse tecnologie di addizione nei bitumi tal quali. Nel corso degli anni si sono verificate ed analizzate, tramite prove di laboratorio, le caratteristiche meccaniche che gli stessi additivi portavano alla composizione del bitume modificato ed alla miscela finale.

Gli additivi, oltre ai polimeri, possono essere di diverso tipo: da quelli di natura organica, come gli oli vegetali, ai composti inorganici, come i silicati o i solfati. I polimeri, invece, sono macromolecole che, per la loro natura chimica, sono in grado di migliorare le proprietà dei bitumi e delle miscele bituminose [7]. In particolare, l'aggiunta di polimeri rappresenta una delle modifiche più comuni per ottenere miglioramenti nelle miscele di conglomerato bituminoso (figura 2).

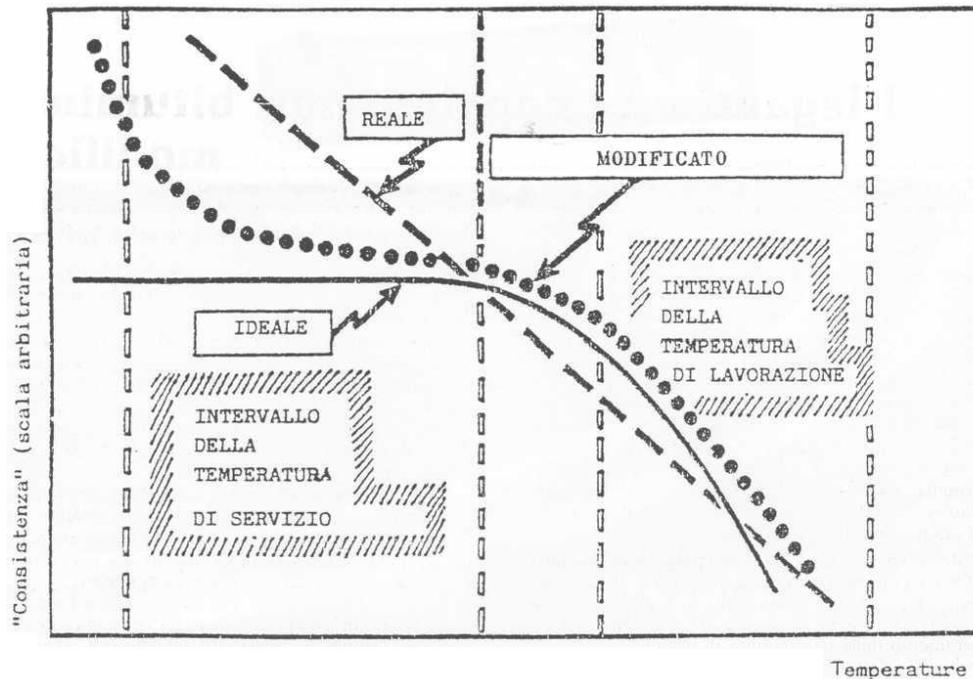


Figura 2 Rappresentazione schematica della suscettibilità termica dei bitumi,

Siteb: Rassegna del bitume 14/89

I polimeri utilizzati nei conglomerati bituminosi possono essere di diversi tipi, tra cui:

- Polimeri termoplastici, come il polietilene, il polipropilene, il policarbonato e il polistirene. Questi polimeri hanno una struttura a catena lineare e possono essere fusi e riutilizzati a temperature elevate.
- Polimeri elastomerici, come il poliuretano, il poliisoprene e il polibutadiene. Questi polimeri hanno una struttura a catena non lineare e possono deformarsi e riprendere la loro forma originale. Tra questi materiali troviamo inoltre le gomme naturali, vulcanizzate, quelle recuperate e riciclate (polveri derivanti da pneumatici fuori uso ecc.)
- Polimeri termoindurenti, come l'epossido, il poliestere insaturo ed altre resine sintetiche. Questi polimeri sono resistenti alle alte temperature e alle soluzioni acide e alcaline, poiché esse sono caratterizzate da un indurimento per aggiunta di un catalizzatore o per esposizione al calore [8].

Alcuni copolimeri, termine utilizzato per indicare un polimero ottenuto a partire da monomeri di due specie differenti, possono identificarsi tra più famiglie sopra elencate, un esempio è il polimero SBS, il più utilizzato nei conglomerati bituminosi destinati alle pavimentazioni stradali. Quest'ultimo è un polimero elastomero termoplastico, composto da catene di Stirene-

Butadiene-Stirene, esso permette di conferire elasticità e resistenza alle deformazioni, il che li rende ideali per le pavimentazioni stradali [8].

Ovviamente, a seconda della categoria di polimeri da trattare, nell'ambito di ciascuna categoria, in funzione del tipo e del dosaggio del polimero impiegato, nonché in relazione al tipo ed alla natura del bitume utilizzato, si ottengono miglioramenti diversi delle caratteristiche del bitume modificato.

Esistono tuttavia dei requisiti comuni che devono essere soddisfatti da tutti i modificanti succitati:

- Il modificante deve essere compatibile con il bitume;
- Il modificante deve presentare una sufficiente stabilità termica alle temperature necessarie per ottenere un'idonea miscelazione con il bitume di base ed un idoneo mescolamento del bitume modificato con gli aggregati lapidei;
- Il modificante non deve innalzare la viscosità del bitume modificato, per consentire l'idoneo mescolamento con gli aggregati e la normale stesa e rullatura dell'impasto;
- Il modificante deve essere resistente all'azione degli agenti atmosferici, ovvero temperatura ed ossidazione, come pure non deve causare un peggioramento del normale fenomeno di invecchiamento del bitume;
- Il modificatore non deve provocare un peggioramento delle proprietà di adesione del bitume [6].

Come abbiamo appena visto, la scelta del tipo di polimero dipende dalle specifiche esigenze della pavimentazione stradale e dalle caratteristiche reagenti tra legante e polimero stesso [6].

La produzione dei conglomerati bituminosi con l'aggiunta di polimeri prevede diverse fasi, che possono variare a seconda della tecnologia utilizzata. In generale, la produzione inizia con l'acquisizione degli aggregati minerali, ovvero roccia frantumata e selezionata in cava. Gli aggregati possono essere di diverse dimensioni, in base alle specifiche richieste per il conglomerato che si intende realizzare. Successivamente vengono trasportati presso il sito di produzione, in cui vengono lavati, selezionati in base alla loro forma e dimensione.

Il passo successivo è quello di essiccare gli aggregati in forni rotanti, al fine di eliminare l'umidità presente al loro interno. Questo processo è importante per garantire che il conglomerato finale abbia le caratteristiche di resistenza e durabilità richieste. Una volta essiccati, gli aggregati vengono pesati e dosati accuratamente, al fine di ottenere la giusta proporzione di componenti per la miscela finale. Questo processo avviene mediante l'uso di una bilancia a nastro o di una bilancia a singola cella di carico.

Il filler, che può essere costituito da materiali come polvere di pietra o sabbia, viene poi aggiunto agli aggregati. Questo aiuta a migliorare la lavorabilità del conglomerato e a garantire la resistenza e la durabilità.

Ora è possibile aggiungere il bitume, che costituisce la fase legante del conglomerato. Se esso è un bitume modificato prodotto con tecnologia "wet", il polimero è stato già precedentemente introdotto e miscelato nel bitume tal quale ed in questa fase il bitume già modificato si meschia con gli aggregati. Nel caso in cui la scelta della tipologia di addizione sia ricaduta sulla tecnologia "dry" in questa fase troviamo la parte solida, costituita dagli aggregati, il legante, formato da bitume tal quale, ed i polimeri che si miscelano tutti in un unico passaggio.

Per entrambe le tecnologie la miscelazione avviene a temperature elevate, al fine di garantire una distribuzione uniforme del bitume nella miscela.

Durante il processo di produzione, vengono eseguiti controlli sulla qualità del conglomerato, al fine di garantire che il prodotto finale rispetti le specifiche richieste. Una volta prodotto, il conglomerato può essere depositato o distribuito sulle strade attraverso macchine finitrici, atte a stendere in modo uniforme la miscela sulla superficie stradale [3].

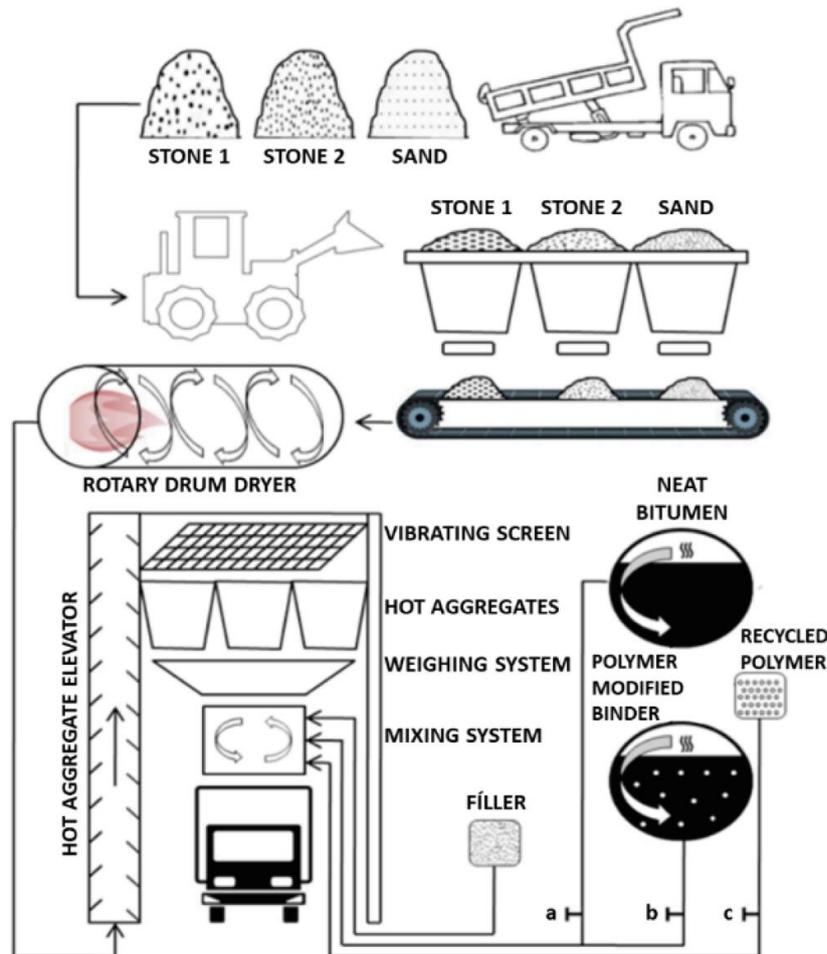


Figura 3 Schema di produzione del conglomerato bituminoso,

“Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads” L. Brasileiro et al. (2019)

Nella figura 2 ci sono le fasi principali coinvolte nella produzione di conglomerato bituminoso. Possiamo notare dall'immagine, che durante la produzione in modalità “wet” il rubinetto ‘b’ sia aperto mentre quelli ‘a’ e ‘c’ restano chiusi. Quindi abbiamo un bitume già addizionato da polimeri all'interno del sistema di miscelazione.

Nella tecnologia “dry” il rubinetto ‘b’ è chiuso, mentre gli altri due restano aperti e perciò, si ha bitume tal quale e polimeri che si incontrano con gli aggregati nel sistema di miscelazione.

È importante sottolineare che il processo di produzione del conglomerato può variare ulteriormente in base alle specifiche richieste per il conglomerato finale [3].

1.1. Tecnologia di addizione “wet”

L'aggiunta di polimeri ai conglomerati bituminosi tramite tecnologia "wet" rappresenta una delle tecniche più utilizzate per migliorare le proprietà meccaniche e la durabilità delle pavimentazioni.

Questa tecnologia si svolge in diversi passaggi, che includono:

- Preparazione del polimero: il polimero viene solitamente fornito in forma granulare o in polvere e deve essere sciolto in un solvente per essere miscelato con il bitume.
- Preparazione del bitume: il bitume viene riscaldato per essere fuso e reso fluido.
- Miscelazione: il polimero viene sciolto nel solvente ad una temperatura di circa 150-180°C. A questo punto, si aggiunge gradualmente il bitume riscaldato, mantenendo la temperatura della miscela intorno ai 160-180°C. La miscela viene quindi miscelata con un agitatore a pale per circa 30-60 minuti, fino a quando avviene una distribuzione uniforme del polimero all'interno del bitume.
- Rimozione del solvente: il solvente utilizzato per sciogliere il polimero viene fatto evaporare mediante riscaldamento e ventilazione.
- Raffreddamento e solidificazione: il composto bituminoso polimerico viene raffreddato e solidificato per essere poi utilizzato nella miscelazione con gli aggregati [10].

I vantaggi dell'addizione dei polimeri in modalità “wet” includono una migliore resistenza alla fatica e alla deformazione permanente, che si traducono in una maggiore durata e una migliore qualità delle superfici stradali. Maggiore resistenza alle sollecitazioni termiche, alle infiltrazioni d'acqua e alle aggressioni chimiche, che contribuiscono alla riduzione dei costi di manutenzione delle strade.

Si registra una maggiore capacità di adesione, che aumenta la tenuta tra la pavimentazione e gli pneumatici e riduce il rischio di incidenti stradali. Inoltre, abbiamo la possibilità di utilizzare polimeri di diversa natura (es. plastiche riciclate, polverini di pneumatici fuori uso) e in diverse concentrazioni, per adattare le proprietà del conglomerato bituminoso alle specifiche esigenze del progetto [10].

Rispetto alle altre tecniche di addizione, l'addizione “wet” ha il vantaggio di consentire la miscelazione dei polimeri con il bitume in modo uniforme, garantendo una maggiore coesione

tra i materiali. Tuttavia, richiede l'utilizzo di solventi e quindi comporta il rischio di contaminazione ambientale e di inquinamento atmosferico, oltre ad eventuali problemi di tossicità per gli operatori. Ovviamente, l'aggiunzione di polimeri e di solventi aumenta il costo rispetto alle miscele realizzate senza bitumi modificati. In alcuni casi si registrano possibili difficoltà nella lavorazione dei materiali, a causa della maggior viscosità della miscela con bitume e polimero.

Inoltre, l'aggiunzione "wet" richiede attrezzature e competenze specifiche per la produzione, stoccaggio e trasporto del conglomerato bituminoso, che comportano costi aggiuntivi [4].

Gli studi condotti su questa tecnologia di addizione hanno sottolineato come quest'ultima sia la migliore per omogeneità dei polimeri all'interno della matrice bitume. Questo vuol dire, che la tipologia di polimeri che possiamo inserire con questa metodologia è veramente ampia.

Tra i più utilizzati nella produzione di conglomerati bituminosi con tecnologia "wet" troviamo i polimeri a base di stirene-butadiene (SBS) che conferiscono una maggiore elasticità e resistenza all'usura, ed i polimeri a base di etilene-vinil-acetato (EVA) che migliorano la resistenza alle basse temperature. In generale però, la scelta del polimero dipenderà dalle proprietà richieste al conglomerato finale [10].

1.2. Tecnologia di addizione “dry”

Tra le diverse modalità di addizione dei polimeri nei conglomerati bituminosi, questa illustrata in questo capitolo rappresenta una delle soluzioni più innovative, che permette di migliorare alcune proprietà della pavimentazione.

La tecnologia di addizione “dry” si svolge nei seguenti passaggi:

- Preparazione del polimero: il polimero viene solitamente fornito in forma granulare o in polvere e viene aggiunto direttamente agli aggregati asciutti.
- Miscelazione: il polimero viene miscelato con gli aggregati utilizzando un miscelatore meccanico.
- Aggiunta del bitume: il bitume fuso viene aggiunto alla miscela di polimeri ed aggregati mentre viene continuamente mescolato.
- Raffreddamento e solidificazione: il conglomerato bituminoso polimerico viene utilizzato direttamente in sito per la formazione di strati di pavimentazione. Una volta compattato, raffreddato e solidificato otteniamo una miscela con proprietà migliorate rispetto ad una convenzionale [11].

Possiamo subito notare come i passaggi in questa tecnologia di addizione siano inferiori rispetto alla prima metodologia analizzata. Inoltre, a differenza della prima, in questa soluzione otteniamo direttamente una miscela finale da utilizzare, mentre nella tecnica “wet” abbiamo bisogno di un’ulteriore miscelazione tra bitume modificato e aggregati.

I vantaggi dell’addizione “dry”, rispetto ad un conglomerato con bitume tal quale, includono una migliore resistenza alla deformazione permanente e alla fatica, maggiore resistenza alla rottura da flessione e alla propagazione delle fessure [11].

Un grande vantaggio rispetto alla prima modalità di addizione analizzata, dal punto di vista organizzativo, è dato dalla possibilità di utilizzare questa tecnica di addizione anche in situazioni di emergenza, in minor tempo, grazie alla semplicità di produzione della miscela finale. Questo è uno dei motivi che rende questo metodo anche meno dispendioso a livello economico rispetto

al metodo “wet”. Un altro punto a favore è anche la mancanza di solventi, indice di un risparmio economico e ambientale [4].

I possibili problemi in cui si può incorrere sono tutti legati all’omogeneità nella distribuzione del polimero, che può influire negativamente sulle proprietà del conglomerato bituminoso prodotto [11].

Secondo una ricerca pubblicata dall’Università di Huelva in collaborazione con l’Università di Nottingham, l’aggiunta di polimeri nella tecnologia “dry” può comportare alcune sfide, tra cui una dispersione non uniforme dei polimeri nella miscela e la possibile formazione di grumi o aggregati di polimero all’interno del bitume.

Per superare queste sfide, gli autori della ricerca (A.A. Cuadri, P. Partal) hanno proposto l’utilizzo di un dispositivo di miscelazione meccanico con una configurazione specifica, che consente una dispersione uniforme dei polimeri all’interno del bitume. In particolare, hanno utilizzato un dispositivo di miscelazione con vite singola a doppia elica, in grado di creare forza di taglio sufficienti per disperdere uniformemente i polimeri all’interno del bitume.

Inoltre, gli autori hanno evidenziato che la scelta del tipo di polimero può influenzare la qualità del conglomerato bituminoso prodotto tramite tecnologia “dry”. In particolare, hanno evidenziato che i polimeri a base di stirene-butadiene (SBS) sono generalmente più adatti a questa modalità di addizione rispetto ai polimeri a base di etilene-vinil-acetato (EVA), in quanto hanno una migliore compatibilità con il bitume e una maggiore capacità di dispersione nella matrice aggregata [12].

2. Programma sperimentale

Le attrezzature e le macchine utilizzate per la realizzazione della tesi appartengono al Politecnico di Torino, precisamente del Laboratorio DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture).

L’obiettivo di questa indagine sperimentale è il confronto tra miscele realizzate con il metodo “wet” e miscele realizzate con il metodo “dry”. Nel dettaglio saranno confrontate due miscele bituminose realizzate con bitume modificato (SBS), appartenenti al primo metodo di addizione, con due analoghe miscele contenenti plastomeri di addizione e prodotte con tecnologia “dry”.

Indichiamo i materiali utilizzati nelle analisi:

- Due conglomerati bituminosi prodotti con tecnologia “wet” contenenti legante modificato con SBS (PMS);
- Due conglomerati bituminosi prodotti con tecnologia “dry” contenenti plastomeri (?);
- Aggregati lapidei delle varie classi (incluso il filler) impiegate per la realizzazione dei conglomerati bituminosi oggetto della sperimentazione;
- Bitume modificato con SBS (tecnologia “wet”);
- Polimeri di addizione (tecnologia “dry”);
- Fibre;

Le miscele bituminose su indicate sono state sottoposte a:

- Valutazione delle caratteristiche compositive: percentuale di legante, distribuzione granulometrica degli aggregati estratti, massa volumica degli aggregati, volumetria (percentuale dei vuoti, vuoti nella miscela degli aggregati, vuoti riempiti di bitume) e curve di addensamento;
- Due scenari di condizionamento: invecchiamento a breve termine ed invecchiamento a lungo termine;

Terminato questo passaggio, deve essere eseguita un’analisi per la valutazione delle prestazioni, quindi di caratterizzazione meccanica delle miscele, fulcro centrale del nostro confronto.

Per ogni miscela, e in ogni scenario di condizionamento, realizzazione di campioni cilindrici mediante pressa a taglio girevole (PTG) a 160 °C.

I campioni così prodotti verranno sottoposti a prove per la determinazione di:

- Resistenza alla rottura per trazione indiretta, prova ITS con 2 modalità di compattazione dei campioni (ad altezza ed a numero di giri), 2 temperature (25°C e 10 °C), 2 velocità (50mm/min e 12,5mm/min), 3 ripetizioni;
- Resistenza alla fatica su provini di forma cilindrica in configurazione IT-CY (3 livelli di tensione);
- Comportamento viscoelastico lineare mediante la valutazione del modulo complesso E^* e dell'angolo di fase δ (9 frequenze e 3 temperature, 3 ripetizioni) con la costruzione delle corrispondenti curve maestre;
- Resistenza alle deformazioni permanenti, determinazione del Flow Number (1 ripetizione);

Per evitare confusioni abbiamo deciso di identificare le quattro miscele analizzate nel seguente modo:

ID MISCELA:	PROVENIENZA MISCELA:
WET_1	Impianto 1
DRY_1	Impianto 1
WET_2	Laboratorio (DIATI)
DRY_2	Impianto 2

3. Caratterizzazione compositiva

In questo capitolo, vengono analizzati i materiali utilizzati nel programma sperimentale di tesi e sono descritti gli strumenti e le varie procedure utilizzate per la caratterizzazione a livello compositivo delle miscele bituminose di studio. In questa sezione vengono illustrate in dettaglio tutte le apparecchiature e i rispettivi protocolli di prova seguiti durante l'analisi sperimentale sulla natura delle miscele.

3.1. Realizzazione nuova miscela

Nel corso del nostro studio sperimentale abbiamo deciso di confrontare, oltre alle due miscele arrivate in laboratorio dall'impianto 1, un'altra coppia di miscele di conglomerato con bitume modificato. Per motivi logistici abbiamo selezionato una miscela già analizzata in laboratorio fornita da un secondo impianto, per quanto riguarda la tecnologia di addizione dry, mentre per il conglomerato wet abbiamo optato per la miscelazione in laboratorio. Abbiamo così deciso poiché avendo già dati riferiti alla prima miscela abbiamo potuto mantenere lo scheletro litico ed altre caratteristiche più simili possibili tra loro, creando una miscela wet con caratteristiche compositive simili alla controparte dry.

Per effettuare la miscelazione abbiamo adoperato il miscelatore automatico BBMAX 80 del nostro laboratorio, esso consente la preparazione di miscele bituminose omogenee attraverso una miscelazione automatica ottenuta tramite il movimento rotatorio di un braccio elicoidale all'interno di una vasca circolare riscaldata con una capienza di 80 litri.



Figura 4 Miscelatore automatico BBMAX 80

La realizzazione della nuova miscela si è svolta seguendo questi step:

Determinazione del mix design

In primo luogo, siamo andati ad analizzare i dati relativi alla composizione della miscela dry, ottimizzandola e cercando di arrivare alla stessa composizione granulometrica, in modo da avere una ricetta più simile possibile per la realizzazione della nuova miscela wet. Procedendo al calcolo in percentuali delle varie classi granulometriche in peso, più il filler per ottenere un totale di 60kg di aggregati nella miscela finale sciolta.



Figura 5 Aggregati selezionati e dispositivo di quartatura.

Preparazione dei materiali

Per prima cosa avendo 3 grandi classi dimensionali sugli aggregati, rispettivamente la 0-5mm, la 3-8mm e la 5-15mm, abbiamo innanzitutto quartato il materiale per ottenere una distribuzione casuale dei grani per ogni classe. Successivamente sul totale di 60kg di miscela ci siamo calcolati il 6% di bitume da inserire in peso, poiché la miscela dry ha questa percentuale in peso sugli aggregati. Seguendo la normativa ci siamo preparati delle teglie pesate con le diverse classi granulometriche da inserire e la latta di bitume. Per evitare differenze in peso tra i calcoli e la prova, abbiamo provveduto ad asciugare gli aggregati, per evitare umidità, lasciandoli in forno a 105°C fin quando non hanno avuto più perdite in peso.



Figura 6 Aggregati pesati e proporzionati per la miscela.

Miscelazione

Per prima cosa inseriamo gli aggregati e il bitume in forno, i primi alla temperatura di 160/180°C e il bitume ad una temperatura di 150/180°C. Contemporaneamente accendiamo il nostro miscelatore e impostiamo una temperatura di 165°C, indicata da normativa per la miscelazione. Una volta che i materiali e il macchinario sono giunti alla temperatura desiderata si può procedere con la miscelazione. Il processo deve seguire una dettagliata scaletta di azioni, per iniziare versiamo gli aggregati dal più grande al più piccolo, senza il filler, nel miscelatore e lo facciamo ruotare per 30s a bassa velocità, al termine inseriamo 1/3 di bitume e facciamo

miscelare per altri 30s a bassa velocità, subito dopo inseriamo ancora 1/3 di bitume e 1/2 di filler e misceliamo per altri 30s, come ultimo step inseriamo la restante terza parte di bitume e l'altra metà di filler e facciamo miscelare il tutto per 3min a bassa velocità, a seguire 1min ad alta velocità. Al termine della miscelazione possiamo alzare l'elica miscelante, e dopo aver sganciato i morsetti del serbatoio, possiamo farlo ruotare di 70°/80° per facilitare lo scarico della miscela negli opportuni recipienti.



Figura 7 Termine miscelazione.

3.2. Massima massa volumica teorica (MMVT)

Il primo passo per la caratterizzazione volumetrica è il calcolo della massima massa volumica teorica, di fondamentale importanza per il nostro studio poiché questa è una grandezza intrinseca della miscela. Questa misura ci indica il grado di addensamento massimo limite, ottenuto quando si hanno all'interno del materiale dei vuoti pari a zero. Questa condizione nella pratica non è effettivamente raggiungibile, perciò si parla di grandezza "teorica". Abbiamo calcolato sia la massima massa volumica teorica degli aggregati usati nel mix design che quella delle miscele di conglomerato bituminoso.

Per quanto riguarda la procedura abbiamo seguito la norma di riferimento UNI EN 12697-5. L'indagine sperimentale da seguire in entrambe le norme è analoga, ed all'interno di quest'ultima vengono definite tre procedure: volumetrica, idrostatica e matematica [13]. Il processo da noi utilizzato è stato il volumetrico (anche nominato metodo del picnometro) di seguito vengono riportati i passaggi:

Taratura dei picnometri

I picnometri (dal greco "piknos" ovvero denso) sono degli strumenti utilizzati per determinare la densità dei materiali. Essi sono dei piccoli recipienti, generalmente in vetro ed hanno un tappo con beccuccio capillare. Inizialmente, dobbiamo definire i valori di peso e capacità dei recipienti utilizzati per la prova. Pertanto, ogni contenitore è stato pesato prima vuoto e poi nuovamente riempito con acqua distillata e privata dell'aria, fino a formare un piccolo rigonfiamento convesso sulla parte superiore del beccuccio. Dividendo il peso ottenuto per la densità dell'acqua alla temperatura della prova, si può calcolare la quantità di acqua presente nel recipiente e, conseguentemente, la sua capacità effettiva.



Figura 8 Taratura dei picnometri.

Preparazione del campione

Per ogni miscela abbiamo prelevato due campioni di materiale sciolto, utilizzando la quantità definita dalla normativa, quest'ultima dipendente dalla dimensione massima degli aggregati all'interno della miscela da analizzare. I campioni sono stati inizialmente scaldati in forno ad una temperatura di 110°C, per renderli lavorabili in modo tale da svolgere l'operazione di sgranamento, cioè separare manualmente i grani e gli agglomerati grossolani.



Figura 9 Sgranamento miscela.

Riempimento dei picnometri e pesatura

Una volta che la miscela sciolta si è raffreddata, si riempiono con essa i picnometri e si pesano, ottenendo il peso del picnometro più miscela.

Processo di disareazione

Successivamente si riempiono di acqua distillata i picnometri con all'interno la miscela e si collegano ad un sistema disaeratore che aspira l'aria intrappolata all'interno. Questo processo richiede almeno 45 minuti, all'interno dei quali si effettua sporadicamente un dolce scuotimento per favorire la salita di bolle d'aria tra i grani della miscela.



Figura 10 Processo di disareazione delle miscele.

Determinazione del peso con aggiunta di acqua

Al termine dei 45 minuti di disareazione si riempiono i picnometri con acqua distillata e disareata fino all'estremità superiore del beccuccio, formando il menisco convesso già visto in precedenza. Dopodiché viene pesato il tutto, definendo la massa del picnometro con all'interno la miscela e l'acqua. Inoltre, viene misurata la temperatura dell'acqua all'interno dei picnometri.



Figura 11 Misurazione della temperatura.

Calcolo della Massima Massa Volumica Teorica

Dopo aver svolto tutti i precedenti passaggi e ricavato i dati, possiamo terminare la prova calcolando la MMVT impiegando la formula circoscritta all'interno della normativa di riferimento con il metodo volumetrico:

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

Dove:

- ρ_{mv} è la MMVT in [Mg/m³] con approssimazione allo 0,001 Mg/m³;
- m_1 è la massa del picnometro con beccuccio capillare tarato, in [g];
- m_2 è la massa del picnometro con beccuccio capillare ed all'interno la miscela, in [g];
- m_3 è la massa del picnometro con beccuccio capillare ed all'interno la miscela analizzata più l'acqua distillata e disareata, in [g];
- V_p è il volume del picnometro tarato, in [m³];
- ρ_w è la densità dell'acqua in [Mg/m³].

Come già accennato, il valore che rappresenta la massima densità teorica della miscela presa in esame viene calcolato come media dei dati ottenuti dalle analisi dei due campioni.

Massima massa volumica teorica degli aggregati

Per quanto riguarda il processo di calcolo della massima massa volumica teorica degli aggregati contenuti nelle miscele analizzate, il procedimento è il medesimo visto in questo capitolo.



Figura 12 Processo di disareazione degli aggregati.

La precauzione necessaria riguarda il processo di rimozione dell'aria che deve essere effettuato alcune ore dopo l'aggiunta di acqua distillata nei picnometri, in modo che le particelle più piccole possano sedimentare.

3.3. Contenuto di legante

Nella miscela di conglomerato bituminoso si deve verificare che la curva di distribuzione granulometrica corrisponda a quella di progetto, ma per ottenere gli aggregati senza legante, ovviamente prima si deve estrarre il bitume presente. Questo processo ci permette di calcolare il contenuto di bitume nella miscela.

La procedura viene eseguita seguendo la normativa 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 consiste nel collocare all'interno di un cestello in acciaio, dotato di due ripiani sovrapposti per consentire un'omogenea divisione del materiale, un quantitativo di miscela bituminosa e successivamente inserirlo in un forno, denominato carbolite. Quest'ultimo lavora alla temperatura di 540°C e al suo interno è presente una bilancia capace di valutare le variazioni di peso [14]. Di seguito i passaggi:

Tara cestello

Il primo passo da seguire consiste nella pesatura del cestello senza alcun contenuto, al fine di ottenere la tara necessaria per le operazioni successive. Il contenitore è realizzato in un robusto materiale metallico resistente alle elevate temperature e presenta una struttura composta da due livelli.

Preparazione del campione

Nella fase successiva, si utilizza di nuovo il campione precedentemente impiegato per determinare la massima massa volumica teorica. Tuttavia, prima di poter procedere, è necessario rimuovere l'acqua in eccesso, facendola evaporare attraverso un processo di riscaldamento alla temperatura di 105°C, finché non si osservano ulteriori variazioni di peso. Dopo il raffreddamento, il campione viene distribuito uniformemente sui due livelli del cestello e successivamente pesato, ottenendo così la massa totale del cestello e del materiale. Sottraendo il peso della tara a totale, si può calcolare la massa del solo materiale (M_{mix_net}). La quantità esatta di materiale da utilizzare è stabilita dalla specifica normativa di riferimento.



Figura 13 Caricamento del cestello.

Esecuzione della prova

Il campione nel cestello viene inserito sulla bilancia all'interno della carbolite nel momento in cui essa ha raggiunto la temperatura di 540°C. A quel punto si fa partire la prova e inizia il processo di combustione del legante bituminoso con perdita di massa. Quando il macchinario carbolite avverte che non ci sono più variazioni in peso emette un suono che avvisa il termine della prova (circa 30 minuti).



Figura 14 Macchinario Carbolite.

Pesatura del campione al termine della prova

Ultimata la prova, si lascia refrigerare ed in seguito si pesa il tutto, successivamente si ricava per differenza il peso netto degli aggregati M_{agg_net} . La discrepanza tra la massa della miscela netta prima della prova e quella al termine della prova, procura il valore di bitume perso B_{perso} .



Figura 15 Cestello post prova.

Calcolo della percentuale di legante

Al termine di tutti i passaggi della prova possiamo utilizzare le successive formulazioni per ottenere la percentuale di bitume riguardo la miscela e la percentuale di bitume riguardo agli aggregati:

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

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

Nella pratica, le miscele di conglomerato bituminoso analizzate contengono anche polimeri e relative fibre (rappresentate in percentuale rispetto agli aggregati come %P) che vengono completamente bruciati durante la procedura di ignizione. Per considerare la loro presenza, la formula da adottare è la seguente:

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

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

Nel nostro caso, per una procedura più dettagliata, si è provveduto successivamente con l'inserimento in carbolite anche dei polimeri e delle fibre, in due distinte prove. L'obiettivo di questa ripetizione è stato scoprire le relative perdite in peso.



Figura 16 Perdite in peso dei polimeri.



Figura 17 Perdite in peso delle fibre.

3.4. Analisi granulometrica

Attraverso l'analisi granulometrica, è possibile determinare la distribuzione degli aggregati all'interno delle miscele di conglomerato bituminoso, utilizzando il metodo di vagliatura regolamentato dalla norma BS EN 12697-2 [15]. Nel contempo, si fa riferimento al Capitolato Speciale d'Appalto, il quale stabilisce i limiti granulometrici che devono essere rispettati.

Nella tabella 1 sono riportati i fusi limite del livello di nostro interesse, ovvero lo strato di usura.

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

Tabella 1 Limiti di passante strato di usura.

Le prove per caratterizzare le miscele devono essere eseguite in successione. Pertanto, il campione da utilizzare per la vagliatura è lo stesso che è stato sottoposto alla procedura di ignizione, per cui conosciamo già la sua massa. La procedura per la definizione delle curve granulometriche si articola nei seguenti passaggi:

Lavaggio degli aggregati

Per la pulizia del materiale da analizzare, sono necessari due setacci con apertura delle maglie da 2mm e 0,063 mm rispettivamente. Il materiale viene dapprima posto in una teglia per aggregati e successivamente pulito mediante l'uso di pennelli per rimuovere eventuali detriti presenti sui cestelli della carbolite. Successivamente, il materiale viene posto nel setaccio con apertura delle maglie da 2mm, posto sopra a quello con apertura delle maglie da 0,063 mm. Il lavaggio manuale del materiale inizia con l'utilizzo di acqua corrente e continua fino a quando l'acqua che scorre dal setaccio da 0,063 mm non risulta limpida, il che indica una completa rimozione del filler. Al termine del lavaggio, il materiale bagnato viene posto con cautela nella teglia per evitare la

perdita di elementi e per evitare di sovrastimare la presenza del filler. Il materiale viene quindi lasciato in forno a una temperatura di $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ per almeno 12 ore, come stabilito dalla normativa.



Figura 18 Lavaggio aggregati.

Setacciatura

Una volta che gli aggregati sono completamente asciutti, è possibile procedere con la setacciatura. Il setaccio è costituito da un contenitore dotato di una griglia metallica nella parte inferiore, che permette di filtrare gli aggregati. La dimensione delle maglie di ogni setaccio varia in base alla grandezza degli aggregati da filtrare. Seguendo le specifiche indicate dal Capitolato Speciale d'Appalto, i vari setacci vengono sovrapposti in modo da formare una colonna verticale, dove la larghezza delle maglie aumenta progressivamente dal basso verso l'alto. Prima di iniziare la setacciatura, è necessario definire le tare dei singoli setacci, compreso il fondello, e poi inserire il materiale dall'alto e posizionare la colonna all'interno dell'agitatore meccanico. Attivando il macchinario, la colonna di setacci viene sottoposta a un movimento vibratorio che permette agli aggregati di passare attraverso le maglie dei vari setacci e di separarsi in base alle loro dimensioni. Una volta completata la setacciatura, che di solito richiede circa 10 minuti, è necessario eseguire un controllo visivo e manuale per verificare il successo dell'operazione.



Figura 19 Formazione della colonna di setacci.



Figura 20 Colonna di setacci durante l'azione dell'agitatore.

Descrizione del passante progressivo

Una volta completata la vagliatura degli aggregati, si dovrà procedere con la pesatura dei singoli setacci che hanno trattenuto gli aggregati. Questa operazione permetterà di calcolare il trattenuto netto di ogni setaccio, tenendo conto della tara. Utilizzando il trattenuto progressivo, espresso in percentuale (ottenuto moltiplicando per 100 e dividendo per la massa totale trattenuta, che include anche il filler che abbiamo perso nel lavaggio e quello residuo nel fondello), sarà possibile calcolare il passante progressivo, che rappresenta il completamento a 100 del trattenuto progressivo. Infine, si potrà costruire la curva granulometrica del campione su un grafico semi-logaritmico, riportando il passante progressivo e i limiti previsti del Capitolato

Speciale d'Appalto in funzione dell'apertura dei setacci, e si valuterà la corrispondenza con il fuso descritto dai limiti.



Figura 21 Setacci al termine del processo di setacciatura.

3.5. Compattazione con pressa a taglio giratorio

Per valutare le caratteristiche volumetriche dei diversi campioni, per ogni tipologia di miscela, si utilizza il macchinario chiamato “pressa a taglio giratorio” che simula in laboratorio i fenomeni che avvengono in situ durante la fase di compattazione con i rulli compattatori. La pressa giratoria, sviluppata nell’ambito del Strategic Highway Research Program, è stata normata dalla BS EN 12697-31 ed è un’innovazione rispetto alla tecnica di compattazione Marshall in quanto rappresenta meglio l’effetto dei rulli compattatori e permette di valutare sia lavorabilità che grado di addensamento.

Per utilizzare la pressa a taglio giratorio, si inseriscono le fustelle in acciaio con diametro di 100 o 150 mm all’interno del pistone del macchinario, riempiendole con il materiale da compattare. Durante il funzionamento, la pressa gira e compatta il campione applicando un carico costante rotazionale. Di seguito, analizzeremo il processo adottato per la realizzazione dei campioni.

Preparazione delle fustelle e del materiale

Il processo di preparazione dei campioni per le prove di laboratorio dei conglomerati bituminosi prevede diversi passaggi. In primo luogo, si deve preparare la fustella e il quantitativo di materiale da inserire al suo interno. Questo viene fatto portando la fustella e la miscela sciolta in conglomerato bituminoso proveniente dall’impianto alla temperatura di 160°C, che è quella richiesta dal Capitolato Speciale d’Appalto. Tuttavia, la temperatura di compattazione può variare a seconda delle richieste specifiche dei diversi Capitolati. Dopo aver posizionato un filtro separatore tra la fustella e la miscela e aver verificato che la temperatura sia corretta tramite un termometro laser con delle sonde, è possibile riempire le fustelle con il materiale.

Per quanto riguarda il quantitativo di massa da inserire, anch’esso è definito dalle normative, per mezzo della formula:

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

Dove:

- M è la massa della miscela da inserire, in [g];
- D è il diametro della fustella, in [mm];
- ρ_M è la Massima Massa Volumica Teorica, in [Mg/m³];
- h_{min} è il valore di altezza minima che coincide l'avere una percentuale di vuoti uguale a zero, in [mm].

Il valore di altezza minima deriva dal rapporto h_{min}/D , che deve essere incluso tra 0,66 e 1,05.

Una volta inserito il materiale all'interno della fustella, si inserisce il secondo filtro sulla parte superiore e si poggia il tappo in acciaio, che andrà a diretto contatto con il pistone della pressa. Poiché l'operazione di riempimento delle fustelle comporta un abbassamento delle temperature, si inserisce nuovamente tutto il sistema in forno e si attende che la temperatura torni a quella prevista per la compattazione.



Figura 22 Riempimento della fustella.



Figura 23 Fustelle in forno a condizionare.

Compattazione

La pressa giratoria utilizzata può funzionare in due modalità: la compactazione a numero di giri e la compactazione ad altezza. Nel primo caso, si stabilisce il valore di numero di giri da raggiungere, di solito specificato nel Capitolato Speciale d'Appalto, e si ottiene un'altezza finale determinata. Nel secondo caso, invece, si stabilisce il valore di altezza da raggiungere indipendentemente dal numero di giri. Nel nostro studio sperimentale, abbiamo utilizzato entrambe le modalità di compactazione in base alle finalità richieste. Inoltre, la procedura è la stessa per entrambe le tipologie di compactazione.

Nel processo, le fustelle riempite con il materiale, alla temperatura di 160°C, vengono inserite nella pressa dopo un'apposita lubrificazione nei punti di contatto tra la fustella e la pressa. Successivamente, il sistema attiva due forze: una forza verticale di 600 kPa, applicata dal pistone, e una forza di taglio, causata dalla rotazione della fustella all'interno della macchina. La fustella compie 30 giri al minuto con un'inclinazione di 1,25° rispetto alla verticale. Questa combinazione di forze simula in maniera efficace il processo di compactazione dei rulli sul campo. Un software collegato alla macchina registra i valori di altezza ad ogni giro per determinare il grado di compactazione e la lavorabilità della miscela.



Figura 24 Pressa a taglio giratorio.

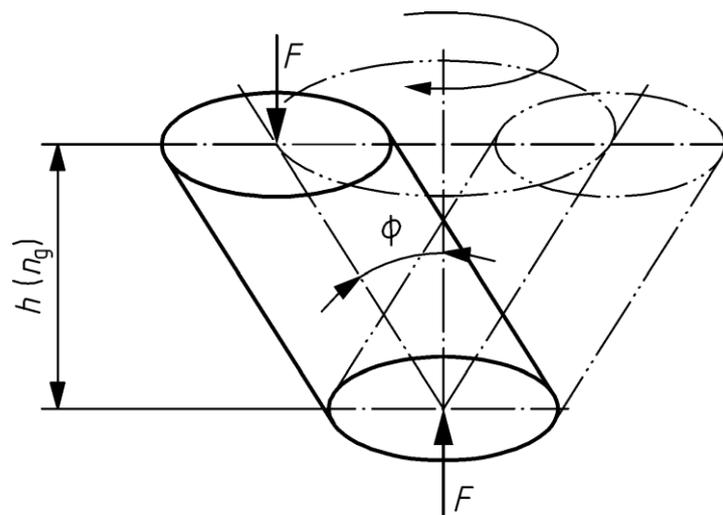


Figura 25 Rappresentazione schematica del funzionamento della pressa a taglio giratorio,

“Specimen preparation by gyratory compactor” UNI EN 12697-31 (2019).

Estrazione del campione

Una volta completata la compattazione, la fustella viene rimossa dalla pressa giratoria e posta su un pistone idraulico che permette di estrarre il campione verso l'alto. Successivamente, i filtri vengono rimossi e il campione viene lasciato raffreddare a temperatura ambiente per un periodo di 24 ore. In questa fase, è importante evitare di estrarre il campione troppo rapidamente, poiché ciò potrebbe causare un cambio di temperatura e un peso eccessivo, causando il collasso del

campione. Il giorno successivo alla compattazione, i campioni vengono misurati, pesati nuovamente e viene scritto il codice identificativo su ciascuno di essi.



Figura 26 Estrusione del campione.



Figura 27 Rimozione dei filtri.

Costruzione delle curve di compattazione e relativi vuoti interni

Tramite i dati acquisiti dalla compattazione, si possono costruire le curve. Si riportano i dati su un grafico semi-logaritmico che ha sull'asse y il grado di compattazione C in percentuale, e sull'asse x il numero di giri impiegati. Dall'analisi della curva di compattazione si derivano due parametri che esprimono in maniera quantitativa la lavorabilità e l'auto-addensamento della miscela. In riferimento al primo, la pendenza (k) della curva di compattazione fornisce tale valore e la sua

ordinata d'origine (C_1) ci procura l'auto-addensamento. Tali parametri sono stati determinati mediante regressione lineare dalle curve di compattazione di ciascun campione.

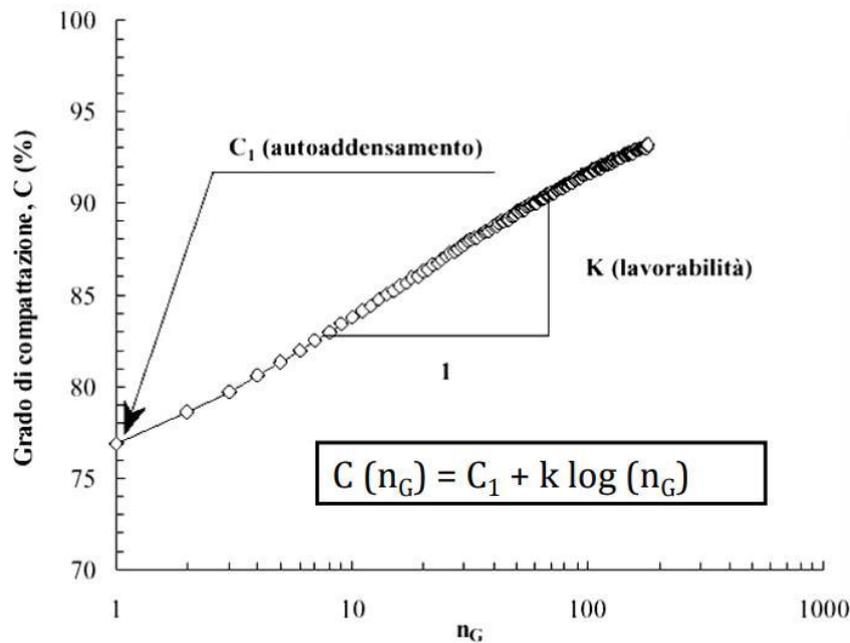


Figura 28 Esempio curva di compattazione.

L'auto-addensamento è collegato alle caratteristiche granulometriche degli aggregati; infatti, esso è maggiore quando la granulometria si avvicina a quella di massimo addensamento, risultando sensibile alla forma degli aggregati. La lavorabilità invece, dipende dal contenuto di bitume e viene associata alla viscosità della miscela.

Attraverso le curve di compattazione è possibile ricavare ulteriormente anche il contenuto di vuoti reali, per ognuno dei giri, interni al campione compattato. È molto pratico poiché all'interno dei Capitolati Speciali d'Appalto è ricercato che vengano rispettati contemporaneamente specifiche percentuali di vuoti a specifici numeri di giri, a seconda dello strato della pavimentazione analizzato.

Definizione del volume geometrico del campione:

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

Percentuale di compattazione senza considerare l'effetto parete:

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

Percentuale di compattazione considerando l'effetto parete:

$$C_x[\%] = \frac{C_{ux} * MV * V_{xfinale}}{M_{effettiva}}$$

Percentuale di vuoti del campione:

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

La relazione analitica che associa i parametri di compattazione è assimilabile ad una retta con la seguente espressione:

$$C = C_1 + k * \log(N)$$

Dove:

- C_1 è l'auto-addensamento della miscela.
- k è lavorabilità della miscela.
- C è la percentuale di costipamento.
- N è il numero di giri.

3.6. Massa volumica

Dopo aver compattato i campioni utilizzando la pressa rotativa, si procede alla determinazione della massa volumica, una proprietà fondamentale per definire il volume dei vuoti presenti all'interno dei campioni. A differenza della MMVT calcolata precedentemente, questa rappresenta fisicamente la densità reale del campione. Per effettuare questa misurazione, si fa riferimento alla norma UNI EN 12697-6, che stabilisce diverse procedure per la sua determinazione [17].

Noi abbiamo trovato questa caratteristica grazie alla procedura della pesata idrostatica, analizziamo di seguito i suoi passaggi:

Massa del campione secco

Il campione a temperatura ambiente viene pesato in modo da definire la sua massa m_1 .



Figura 29 Pesata del campione asciutto.

Massa del campione in acqua

Successivamente viene inserito il campione all'interno di un contenitore riempito di acqua, in modo che i vuoti d'aria vengano riempiti del tutto di acqua. Questa fase dura dai 30 ai 60 minuti, andando a scuotere e girare i campioni di tanto in tanto per permettere un completo riempimento di acqua all'interno. Il passo successivo consiste nel pesare il campione immerso d'acqua con una bilancia, collegata tramite un gancio al cui interno collochiamo il campione

immerso, ottenendo il valore della massa m_2 . Inoltre, è necessario valutare quantitativamente con un termometro la temperatura dell'acqua, da cui se ne otterrà la densità grazie alla successiva formula:

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



Figura 30 Campioni immersi in acqua.

Massa SSD

Effettuata la pesata precedente, si estrae il campione dall'acqua e molto velocemente si asciuga la superficie esterna con un panno umido in camoscio, ed infine si pesa il campione determinando la massa m_3 . Questa misurazione avviene con campione saturo d'acqua con superficie asciutta (SSD).

Massa volumica e percentuale dei vuoti

A questo punto determiniamo la massa volumica tramite la seguente formula:

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

Per la percentuale dei vuoti invece:

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

3.7. Scenari di condizionamento a lungo termine

I campioni preparati in laboratorio presentano proprietà differenti da quelli prodotti negli impianti di produzione per vari motivi. Uno di questi è l'invecchiamento della miscela durante il passaggio dall'impianto, lo stoccaggio, il trasporto, fino al raffreddamento. Durante queste fasi, il legante reagisce con l'ossigeno dell'aria e diventa più rigido e fragile. Inoltre, le alte temperature durante la costruzione possono eliminare alcune frazioni volatili del legante, mentre l'aggregato può assorbirne parte quando il legante è ancora fluido. Questi effetti sono più intensi nei climi caldi o durante i mesi estivi, quando le temperature sono di norma più elevate.

Preparando i campioni in laboratorio è importante considerare questi cambiamenti nelle proprietà della miscela. Una soluzione è quella di condizionare le miscele simulando l'invecchiamento che si verifica durante la costruzione e nel servizio.

La procedura a breve termine è utilizzata per simulare l'invecchiamento fino al momento della compattazione, mentre quella a lungo termine simula l'invecchiamento durante la vita della pavimentazione. L'invecchiamento a lungo termine è quindi utilizzato per i test che simulano le proprietà della miscela in una fase avanzata della vita della pavimentazione.

Poiché le miscele da noi analizzate sono giunte in laboratorio dall'impianto, il condizionamento a breve termine si ritiene già effettuato e quindi i campioni saranno soltanto compattati e testati. Per completezza abbiamo deciso di analizzare il condizionamento a breve e lungo termine per due conglomerati bituminosi, uno "wet" e uno "dry", seguendo la normativa americana AASHTO R30. In seguito, i campioni invecchiati verranno confrontati tra loro in un test di trazione indiretta.

Il condizionamento a lungo termine invece si sviluppa nelle seguenti fasi:

Campione compattato con pressa giratoria

Il campione di conglomerato bituminoso deve essere compattato in giratoria, secondo la norma T 312, fino al livello di compattazione richiesto per le prove da eseguire. Al termine della compattazione non bisogna estrarre il campione dallo stampo.

Condizionare il campione compattato raffreddandolo nella fustella della giratoria a $140^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{F}$ ($60^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$). Quest'operazione richiede in genere circa 2 ore. Successivamente è possibile

rimuovere la fustella e il campione dal forno e lasciarlo raffreddare a temperatura ambiente. Il campione può essere estruso dallo stampo di compattazione dopo 2-3 ore di raffreddamento.



Figura 31 Campioni prodotti con pressa giratoria.

Verifica delle caratteristiche volumetriche

Prima di procedere con il test è di nostro interesse andare a calcolare la massa volumica, ripetiamo i passaggi spiegati nel capitolo precedente ed infine lasciamo asciugare completamente i campioni. Ripetiamo questo passaggio perché vogliamo dei campioni con percentuali di vuoti tra loro confrontabili nel miglior modo possibile.

Condizionamento a lungo termine

Una volta che abbiamo i campioni pronti per essere invecchiati possiamo metterli in forno a $185 \pm 5^\circ\text{F}$ ($85 \pm 3^\circ\text{C}$) per 120h. Dopo 120 ore possiamo spegnere il forno, aprire gli sportelli di quest'ultimo e lasciare raffreddare il campione a temperatura ambiente. Quest'operazione richiede in genere circa 16 ore. Non bisogna toccare o rimuovere il campione dal forno fino alla fine del periodo di raffreddamento. Al termine dell'invecchiamento i campioni verranno testati per le loro caratteristiche meccaniche per capire come agisce il tempo sui due tipi di conglomerati con bitume modificato.



Figura 32 Campioni posizionati in forno per il condizionamento a lungo termine.

4. Caratterizzazione meccanica

Il presente capitolo si concentrerà sulla caratterizzazione meccanica di miscele di conglomerato bituminoso contenente polimeri di addizione nelle due differenti tipologie viste in precedenza. Le prestazioni dei conglomerati bituminosi dipendono dalle loro proprietà meccaniche, che possono essere valutate attraverso specifiche prove di laboratorio.

L'obiettivo del seguente capitolo è quindi, illustrare i procedimenti delle prove atte ad analizzare le prestazioni meccaniche relative alle miscele di conglomerato bituminoso, al fine di definire le relazioni tra le proprietà dei materiali e le prestazioni delle pavimentazioni stradali.

In particolare, verranno svolte prove di resistenza alla rottura per trazione indiretta (ITS) a diverse temperature e differenti velocità di applicazione del carico, prove di fessurazione per fatica, prove per la valutazione del modulo complesso E^* e dell'angolo di fase δ , con la costruzione delle corrispondenti curve maestre e infine, prove per determinare il flow number.

Questi test forniscono informazioni importanti sulla risposta meccanica delle miscele di conglomerato bituminoso contenenti polimeri sotto diversi carichi e condizioni ambientali.

4.1. Resistenza a trazione indiretta (ITS)

La resistenza a trazione indiretta (ITS) è la massima tensione di trazione in un provino cilindrico caricato diametralmente con uno specifico gradiente di deformazione e ad una specifica temperatura di prova. La conoscenza della resistenza a trazione indiretta del conglomerato bituminoso permette di verificarne la conformità ai requisiti delle specifiche tecniche e di prevedere la durata e l'affidabilità delle pavimentazioni costruite con quella particolare miscela. In pratica, è un test che può esserci utile per valutare l'affidabilità e la resistenza del materiale alle sollecitazioni meccaniche a cui è sottoposto.

La normativa di riferimento utilizzata per questa prova è la UNI EN 12697-23, quest'ultima indica un minimo di tre campioni per miscela e indica la dimensione diametrale dei campioni da

analizzare, in base alla dimensione del suo aggregato massimo interno, nel nostro caso abbiamo dei campioni di diametro $100\pm 2\text{mm}$. Per effettuare il test si utilizzano campioni cilindrici poiché permettono di ottenere un risultato omogeneo sia nell'aspetto che nella struttura. Questi, sono compattati con pressa giratoria, ma possono essere ottenuti anche tramite compattazione Marshall oppure da carote derivanti direttamente da pavimentazioni esistenti [18].

Fisicamente, la prova consiste nel comprimere e portare a rottura, un provino cilindrico lungo il piano diametrale verticale, tramite un carico che avanza a velocità costante. La rottura nel materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico per "effetto Poisson". Un altro aspetto importante è la temperatura di prova, essa influenza la resistenza alla trazione indiretta. Si possono applicare temperature di prova comprese tra $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Questo intervallo di temperatura è adatto per raggiungere la cricca di trazione del provino. A temperature più elevate, la modalità di rottura del provino diventa la compressione. Per determinare la resistenza a fatica dei nostri campioni abbiamo utilizzato la pressa statica, essa è composta da una cella di carico da 50kN, con un pistone che si muove verticalmente.



Figura 33 Pressa statica utilizzata per la prova.

La nostra comparazione sperimentale ha prodotto molti dati di questa prova, poiché abbiamo deciso di ripetere il test modificando di volta in volta alcune variabili come: temperatura, velocità di carico, percentuale di vuoti, o l'invecchiamento dei campioni testati.

Vediamo nel dettaglio i passaggi per la determinazione della resistenza a trazione indiretta:

Realizzazione dei campioni

Per realizzare i campioni delle due tipologie di conglomerati analizzati nel nostro studio abbiamo utilizzato la pressa a taglio giratorio. I passaggi ripetuti sono quelli spiegati in precedenza, quindi abbiamo realizzato alcuni campioni mantenendo costante il numero di giri, mentre negli altri campioni mantenendo costante l'altezza.

Posizionamento del campione e preparazione al test

Il campione da analizzare si inserisce in un sistema che tiene il carico verticale perfettamente centrato. Il campione deve condizionare per un minimo di 2h alla temperatura di prova. Il macchinario deve trovarsi in una stanza con temperatura compresa tra i 15°C e i 25°C ed il test deve essere svolto nel minor tempo possibile per evitare variazioni termiche.

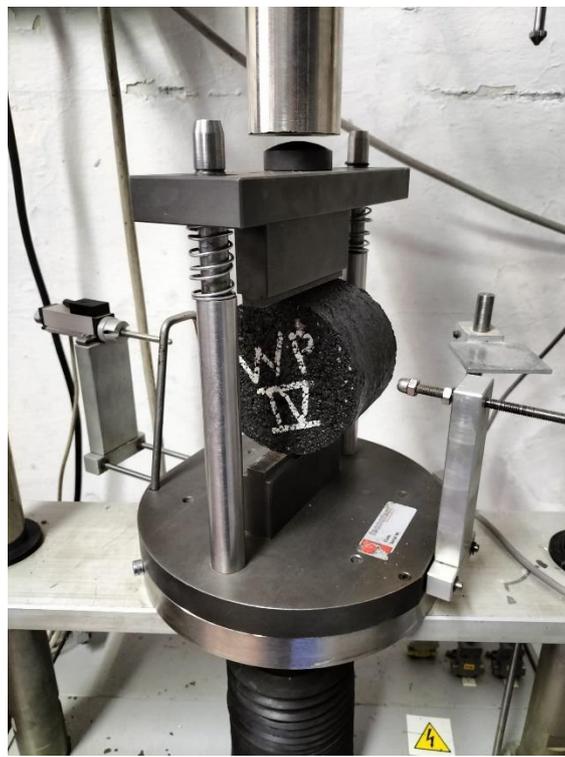


Figura 34 Posizionamento del campione.

Esecuzione della prova

Durante la prova, il campione viene collocato, in maniera centrata, tra le teste di carico della pressa, una delle quali viene fatta avanzare ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. Il sistema permette di misurare sia la deformazione (verticale e orizzontale) subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso.

La resistenza a trazione indiretta del provino può, quindi, essere calcolata mediante la seguente espressione:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} * 1000$$

Dove:

- ITS è la resistenza alla trazione indiretta, arrotondata a tre cifre significative, in kPa.
- P è il carico di picco, arrotondato al numero intero, espresso in N.
- D è il diametro del campione, arrotondato ad una cifra decimale, in mm.
- H è l'altezza del campione, arrotondato ad una cifra decimale, in mm.

Inoltre la normativa in questo test indica di verificare visivamente la rottura dei campioni che può avvenire in 3 modi particolari rappresentati nella seguente figura:

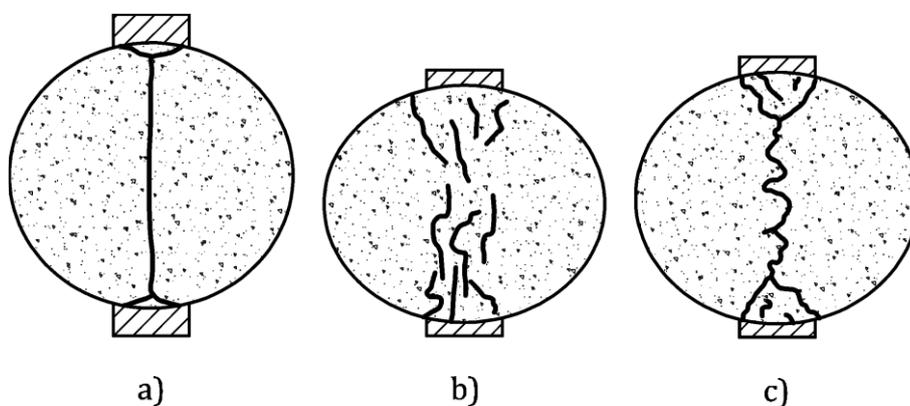


Figura 35 Tipologia di frattura,

“Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens” UNI EN 12697-23(2019)

Vengono caratterizzati come:

- a) "rottura netta a trazione", provini chiaramente rotti lungo una linea diametrale, ad eccezione forse di piccole sezioni triangolari vicino alle strisce di carico.
- b) "deformazione", provini senza una linea di rottura a trazione chiaramente visibile.
- c) "combinazione", provini con una linea di rottura a trazione limitata e aree deformate più grandi vicino alle strisce di carico.

4.2. Resistenza a fatica

La prova a fatica dei conglomerati bituminosi con configurazione IT-CY, descritta nella norma UNI EN 12697-24, consiste nell'applicazione di carichi ripetuti su un campione di conglomerato bituminoso per valutare la sua resistenza alla fatica. Questa prova viene eseguita su provini realizzati con pressa giratoria su cui successivamente verranno montati i trasduttori che registrano la deformazione durante le fasi di carico e riposo [19].

I risultati della prova a fatica vengono espressi in termini di rapporto tra lo sforzo massimo applicato e il numero di cicli necessari per provocare la rottura del campione. Questa prova è importante per valutare la capacità di un conglomerato bituminoso di resistere ai carichi ripetuti, come quelli che si verificano durante il traffico veicolare, che portano alla fessurazione a fatica, contraddistinta nelle pavimentazioni dalla sua forma a pelle di cocodrillo.



Figura 36 Un esempio di fessurazione per fatica,

"Un conglomerato bituminoso composito ad alta durabilità" Strade & autostrade (M.De Deo, 2013)

La fatica è generata dal passaggio ciclico di veicoli che provocano alla base dell'ultimo strato legato un'alternanza, nell'area d'influenza degli pneumatici, di tensioni (e deformazioni) di segno opposto (trazione-compressione) che evolvono nel tempo con una legge assimilabile ad una sinusoidale. Il ripetersi di questo meccanismo porta ad un progressivo accumulo del danno fino alla rottura.

La resistenza a fatica dei conglomerati bituminosi dipende da molteplici fattori legati alle proprietà viscoelastiche del bitume, alla composizione della miscela e caratteristiche finali di addensamento della miscela in sito.

La procedura di realizzazione del test è di seguito riportata:

Realizzazione dei campioni

Per realizzare i campioni delle due tipologie di conglomerati analizzati nel nostro studio abbiamo utilizzato la pressa a taglio giratorio. I passaggi ripetuti sono quelli spiegati in precedenza, quindi abbiamo realizzato dei campioni di diametro 100mm e di altezza superiore ai 40mm, come richiesto dalla normativa.



Figura 37 Campioni realizzati con pressa a taglio giratorio

Verifica delle caratteristiche volumetriche

Prima di procedere con il test è di nostro interesse andare a calcolare la massa volumica, ripetiamo i passaggi spiegati in precedenza, ed infine lasciamo asciugare completamente i campioni.

Incollaggio barre per trasduttori

Una volta che nei campioni non si verificano differenze di peso, quindi asciutti, possiamo procedere nell'incollaggio delle barre atte a reggere i trasduttori che andranno a monitorare durante la prova le deformazioni. Impiegando una colla bifasica (come per i dadini della prova di modulo dinamico) e un particolare strumento in cui posizioniamo il campione, riusciamo a posizionare in modo preciso le barre. Infine, lasciamo asciugare il tutto per il tempo necessario alla colla per asciugarsi.



Figura 38 Fissaggio barre porta trasduttori.

Posizionamento del campione e preparazione al test

Per determinare la resistenza a fatica dei nostri campioni abbiamo utilizzato la macchina UTM-10, 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 ad aria compressa che lo fa muovere verticalmente. Il campione da analizzare si inserisce in un sistema che tiene il carico verticale perfettamente centrato, e nel posizionarlo facciamo in modo che le barre porta-trasduttori restino a livello in posizione orizzontale. Il campione deve condizionare per un minimo di 4h alla temperatura di 10°C, e l'intera prova sarà svolta a questa temperatura.



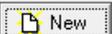
Figura 39 Postazione UTM-10.

Impostazioni interfaccia software

Ora andiamo ad inserire in input le nostre variabili, in primo luogo con un calibro misuriamo il campione in 4 punti per quanto riguarda l'altezza, e in 2 punti il diametro. All'interno del software quindi, oltre all'inserimento delle dimensioni del nostro campione, possiamo modificare altre caratteristiche della prova quali la tensione da applicare ed il tempo delle due fasi di carico e riposo. Nel nostro studio sperimentale abbiamo deciso di applicare 3 livelli di tensione, rispettivamente 1000kPa, 750kPa, 600kPa. Per quanto riguarda il tempo di carico e di riposo, abbiamo seguito quello che suggerisce la normativa, ovvero 100ms di carico e 400ms di riposo, per avere due cicli completi al secondo.

UTS UTS024 1.09b (release 04APR2018) EN12697-24 Indirect Tensile Fatigue Test - W9_(750kPa).D024

File Run Options View Help

 New
  Levels
  Start
  Stop

Set up parameters | Performance tuning | Test results data

Project: W9_(750kPa)

Operator: Lorenzo Bevilacqua

Date and time: Wednesday, March 15, 2023, at 10:19:56 AM

Data file: C:\Users\User\Desktop\TESIST\Lorenzo Bevilacqua\TEST\W9_(750kPa).D024

Template file: C:\Users\User\Desktop\TESIST\Lorenzo Bevilacqua\Template Lorenzo.P024

Comments

Specimen information

Identification: W9_overnight

Dimensions	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Average	Std Dev
Length (mm)	40.5	40.3	40.5	40.5			40.5	0.100
Diameter (mm)	100.0	100.0					100.0	0.000

Remarks

X-Section area (mm²): 7854.0

Loading shape



Select

Transducer configuration

EN12697, on-specimen mounted transducers

Test control parameters

Seating force (N): 50

Estimated Poissons Ratio: 0.35

Target tensile stress (kPa): 750

Target temperature (°C): 10

Loading cycle width (ms): 100

Load cycle rest time (ms): 400

Test termination

Maximum cycle count: 1000000

Max accumulated actuator deformation (mm): 10.0

Permanent horizontal deformation limit (mm): 8

On initial cyclic strain out of range [100..400]:

On machine limit:

Figura 40 Interfaccia software inserimento dati.

Esecuzione della prova

I livelli di deformazione iniziale che la prova deve coprire ricadono in un intervallo da 70 $\mu\epsilon$ a 400 $\mu\epsilon$ per un numero di applicazioni da 10^3 fino a 10^6 . Il numero minimo di provini da testare è di almeno 3. L'onda di carico ha un andamento senoveroso, applicando il carico per 0.1s e lasciandolo a riposo 0.4s.



Figura 41 Campione in configurazione di prova.

Se la deformazione ottenuta durante le prime dieci applicazioni non rientra nell'intervallo di deformazione stabilito, la prova viene interrotta e il livello di carico modificato. Quando appaiono fessure evidenti sull'asse verticale, con conseguente rottura del campione, la prova è da considerarsi terminata.



Figura 42 Rottura del campione al termine della prova.

Determinazione della resistenza a fatica

La resistenza a fatica è definita in termini di numero totale di cicli di carico che individuano la rottura completa del provino. Si misura il rapporto tra il numero totale di applicazioni del carico e deformazione totale. Di seguito le formule per determinare stress e deformazione:

$$\sigma = \frac{2F}{\pi * t * \Omega}$$

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

Dove:

- σ è la sollecitazione di trazione orizzontale al centro del campione, in megapascal (Mpa).
- F è la forza misurata, in newton (N).
- t è lo spessore del nostro campione, in millimetri (mm).
- Ω è il diametro del nostro campione, in millimetri (mm).
- ε è la deformazione orizzontale, in micron per metro ($\mu\text{m}/\text{m}$).
- ΔH è la deformazione orizzontale, in millimetri (mm).

Possiamo notare dalla figura 40 come appare il grafico sull'interfaccia software alla fine della prova di resistenza a fatica.

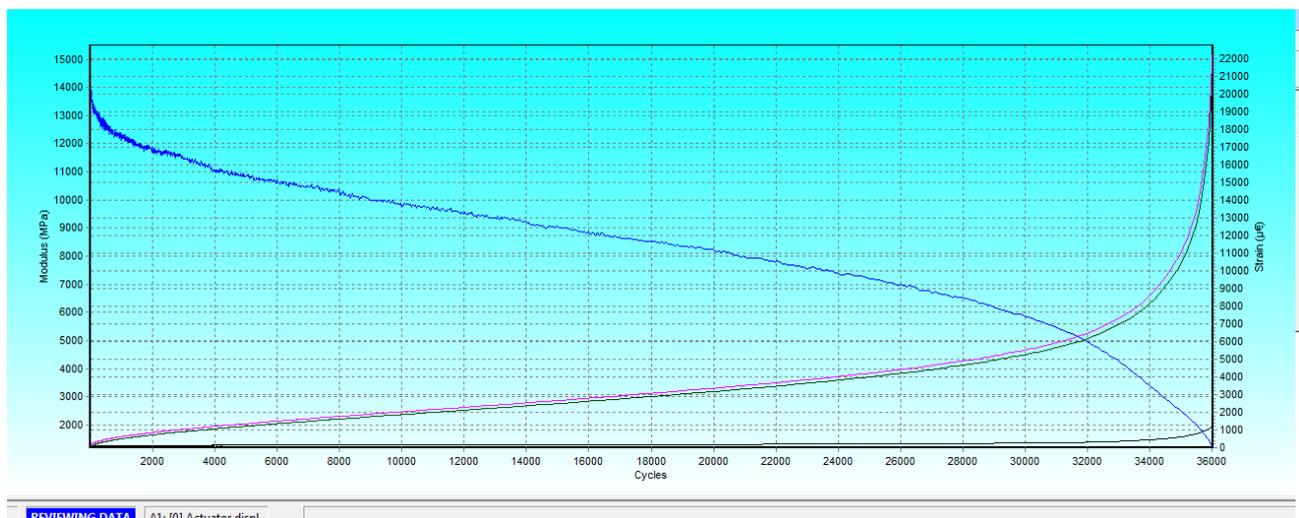


Figura 43 Grafico della fatica sull'interfaccia software.

4.3. Modulo dinamico

Esistono diverse metodologie utilizzate per valutare la rigidità delle miscele in conglomerato bituminoso, tra cui la configurazione in compressione uniassiale, che permette di determinare il cosiddetto “modulo dinamico”. Quest’ultimo si definisce come la norma del modulo complesso E^* , che tiene conto delle proprietà viscoelastiche della miscela e della temperatura a cui essa è soggetta.

In particolare, il modulo complesso E^* è prodotto da due componenti: una prima parte reale E_1 , che raffigura le proprietà elastiche del materiale, una seconda parte E_2 , che riassume le sue proprietà viscosi.

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

Il valore di E^* cresce al diminuire della temperatura e al crescere della frequenza di carico, indicando un comportamento della miscela di tipo elastico. Al contrario, al crescere della temperatura e ad una riduzione 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 di miscela bituminosa sono sottoposti a una sollecitazione di compressione uniassiale sinusoidale controllata a diverse frequenze, mentre la temperatura di prova è definita dal Capitolato Speciale d’Appalto. In dettaglio, le miscele sono state valutate a 4°C, 20°C e 40°C. La sollecitazione applicata viene quindi combinata con la deformazione assiale misurata in funzione del tempo, per calcolare il modulo dinamico e l’angolo di fase.

In sintesi, la configurazione in compressione uniassiale è uno dei metodi più utilizzati per valutare la rigidità delle miscele in conglomerato bituminoso, e permette di ottenere importanti informazioni sul comportamento viscoelastico del materiale, che varia a seconda della temperatura e della frequenza di carico [20,21].

All’interno di questa analisi sperimentale abbiamo eseguito prove di modulo dinamico sia per la miscela contenente polimeri di addizione tramite tecnologia dry sia per l’analoga miscela wet.

4.3.1. Preparazione dei campioni

Secondo la normativa, i campioni dovrebbero avere un diametro di 100 mm e un'altezza di 150 mm, tuttavia, per ragioni logistiche e organizzative, sono stati realizzati con provini delle dimensioni di 94 mm di diametro e 130 mm di altezza [20,21]. Sono stati prodotti tre campioni per ogni miscela esaminata al fine di verificare la corretta lavorazione.

Di seguito, viene fornita una dettagliata descrizione del processo che porta alla loro confezione:

Compattazione

Uno dei principali problemi riscontrati durante la produzione di campioni in laboratorio è l'effetto parete e la disomogeneità di vuoti tra la parte più alta e più bassa del campione, entrambi causati dal metodo di compattazione utilizzato dalla pressa a taglio giratorio. Una soluzione efficace consiste nel compattare campioni di dimensioni più grandi rispetto a quelle di cui abbiamo bisogno e in seguito estrarre il “cuore” interno del campione, che presenta proprietà più omogenee.

In questo contesto, sono stati prodotti campioni cilindrici con dimensioni 150 mm di diametro e 180 mm di altezza tramite la compattazione a pressione elevata utilizzando la pressa a taglio giratorio. Per determinare la quantità di materiale da inserire all'interno della fustella, si è utilizzato il seguente ragionamento: la percentuale di vuoti presenti nel campione intero è sicuramente maggiore rispetto a quella del campione carotato finale che otteniamo.

Tramite esperienza di laboratorio, si è constatato che questa differenza in percentuale ($\Delta\%v$) si trova nell'intorno del 3-4%, motivo per cui i valori percentuali utilizzati in quest'analisi variano all'interno di tale intervallo. Pertanto, la massa da inserire all'interno della fustella è stata calcolata come segue:

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



Figura 44 Campioni realizzati con pressa a taglio giratorio, dimensioni 150x180.

Calcolo della Massa Volumica

Al fine di calcolare dati dell'intero processo e verificare la giusta quantità di materiale introdotto nelle fustelle, è rilevante valutare la massa volumica dei campioni cilindrici di dimensioni 150X180 mm. Tale valutazione è necessaria poiché la variabilità nella lavorazione, nella miscela e nelle operazioni è molto ampia e deve essere costantemente monitorata. Il processo utilizzato per determinare la massa volumica è lo stesso descritto dal capitolo 3.6.

Carotaggio e taglio

Per procedere alla realizzazione del campione di dimensioni 100x130 mm, si utilizzano due macchine: la carotatrice e la taglierina. La carotatrice ha il compito di diminuire il diametro del campione da 150 mm a 100 mm. Per fare ciò, il campione viene posizionato in una vasca al di sotto della componente perforante, con la sua base della compattazione rivolta verso il basso e viene fissato attraverso un supporto in ferro.

Mediante un pulsante, la carotatrice che è dotata di un utensile di perforazione diamantato, viene messa in moto ed inizia a ruotare. Manualmente ruotiamo il manubrio superiore, che implica uno spostamento dell'utensile atto alla perforazione nella direzione verticale, a velocità costante. Durante il processo di carotatura, viene mantenuta stabile la temperatura per mezzo di acqua. Alla fine del processo otteniamo un campione di 100 mm in diametro e 180 mm in altezza, in realtà il diametro interno misurato è di circa 94 mm.

Il passaggio successivo è quello del taglio delle basi mediante taglierina, una sega circolare a lama diamantata. Posizionato il campione all'interno, si avvia la macchina composta dalla lama rotante posta al livello del taglio da effettuare sul campione e, per gravità, viene tagliato. Anche in questo caso il sistema è dotato di un sistema di raffreddamento 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, poiché il campione si compatta maggiormente nella parte inferiore.

Le due basi del campione sono tagliate con diverso spessore per compensare la minore compattazione della sua parte superiore. Per questo motivo, viene realizzato un taglio di 35 mm partendo dal lato superiore e uno di 15 mm partendo dalla base, poiché la parte inferiore del campione vi è una compattazione maggiore.



Figura 45 Fase di carotaggio del campione.



Figura 46 Taglio delle basi del campione.

Verifica delle caratteristiche volumetriche

Il passaggio successivo è la verifica del contenuto di vuoti. Viene effettuato un controllo trovando la massa volumica del campione analizzato. In processo seguirà degli step leggermente diversi rispetto alla procedura standard, poiché essendo già bagnato a causa del carotaggio e taglio, sono state effettuate prima le pesate in acqua e quella del campione saturo a superficie secca e infine la pesata del campione secco asciugato. Possiamo considerare il campione del tutto asciutto e pesarlo appena notiamo che non ci sono più differenze in peso nel tempo.



Figura 47 Pesata del campione asciutto.

Preparazione prova di modulo dinamico

Il passaggio finale consiste nell'inserimento manuale di dadi che serviranno da supporto ai morsetti sui quali verranno applicati i trasduttori per misurare la deformazione assiale. Per effettuare l'incollaggio, si impiega un macchinario che adopera un sistema ad aria compressa avente tre bracci mobili su cui viene montata una barra, sulla quale vengono avvitate i dadi posti alla stessa altezza e distanza di 100 mm l'uno dall'altro (da normativa). Il campione viene posizionato al centro dei tre bracci e, dopo l'applicazione della colla epossidica (materiale bicomponente a presa rapida composto da un legante e un indurente), accendendo il sistema di aria compressa, i bracci mobili si chiuderanno sul campione e avverrà il fissaggio dei dadi.

Successivamente, sarà sufficiente rimuovere le barre e aprire il sistema ad aria per ottenere il campione completo con i dadi fissati.



Figura 48 Sistema di fissaggio dadi.



Figura 49 Campioni iniziali e finali a confronto.

4.3.2. Esecuzione della prova

La prova è stata compiuta utilizzando la macchina UTM-30, in una configurazione non confinata. Questa macchina è composta da una cella climatica con un attuatore idraulico che applica il carico desiderato in modo verticale e una traversa mobile su cui viene posizionato il campione. Nei dadini del campione vengono fissati i supporti sui quali vengono montati i trasduttori per la misurazione delle deformazioni verticali.

Per la prova sono state seguite le norme: AASHTO T 378-17 e AASHTO T342-11 [20,21].

Il test viene eseguito seguendo i seguenti passaggi:

Preparazione del campione

Sul campione da testare si montano i porta-trasduttori e si posiziona tra due supporti cilindrici, uno in testa ed uno alla base, in modo che non si trovi a diretto contatto con l'attuatore durante la prova. In seguito, posizioniamo 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. Infine, aiutando con la finestra dei livelli nel software della prova ci aiutiamo a fissare in modo corretto i trasduttori.



Figura 50 Preparazione del campione.



Figura 51 Campione in configurazione di prova.

Impostazioni interfaccia software

La figura mostra l'interfaccia del software, dove possiamo notare le impostazioni inserite. Dovranno essere 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: 0,1-0,2-0,5-1-2-5-10-20-25 Hz.

UTS006 3.06 AMPT Dynamic Modulus Test - PMB1(20°C).D006

File Run Options View Help

Dimensions	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)	130.5	130.5	130.5	130.5			130.50	0.000

Cross-sectional area (mm²) 6939.8

SI units: Target test temperature (°C) 20, Target confining stress (kPa) 0, Initial modulus (MPa) 1000, Axial gauge length (mm) 70, Loading shaft diameter (mm) 0
 US customary units: Target test temperature (°F) 68, Target confining stress (psi) 0, Initial modulus (ksi) 145.04, Axial gauge length (in) 2.76, Loading shaft diameter (in) 0

Average dynamic strain range from 75 to 125 micro-strain
 Contact stress (% of dynamic stress) 5
 Rest period between sweeps (min) 0
 Apply contact stress correction

Figura 52 Interfaccia software inserimento dati.

Prova di modulo dinamico

A questo punto attraverso l'interfaccia software si fa partire la prova. L'attuatore provoca un carico sinusoidale a diverse frequenze, iniziando dalla più grande, e per ognuna di essa si hanno dieci cicli di carico. Prima dell'azione del carico e per ognuna delle frequenze, il sistema effettua dieci impulsi di calibrazione, per far sì che non si superi la soglia di deformazione compresa tra 75 e 125 micro-strain. Il test viene eseguito senza pressione di confinamento e non è distruttiva: infatti il carico applicato è tale per cui il campione in conglomerato bituminoso rimane nel range di comportamento visco-elastico, e quindi possibile utilizzarlo successivamente anche per altre prove [20,21].

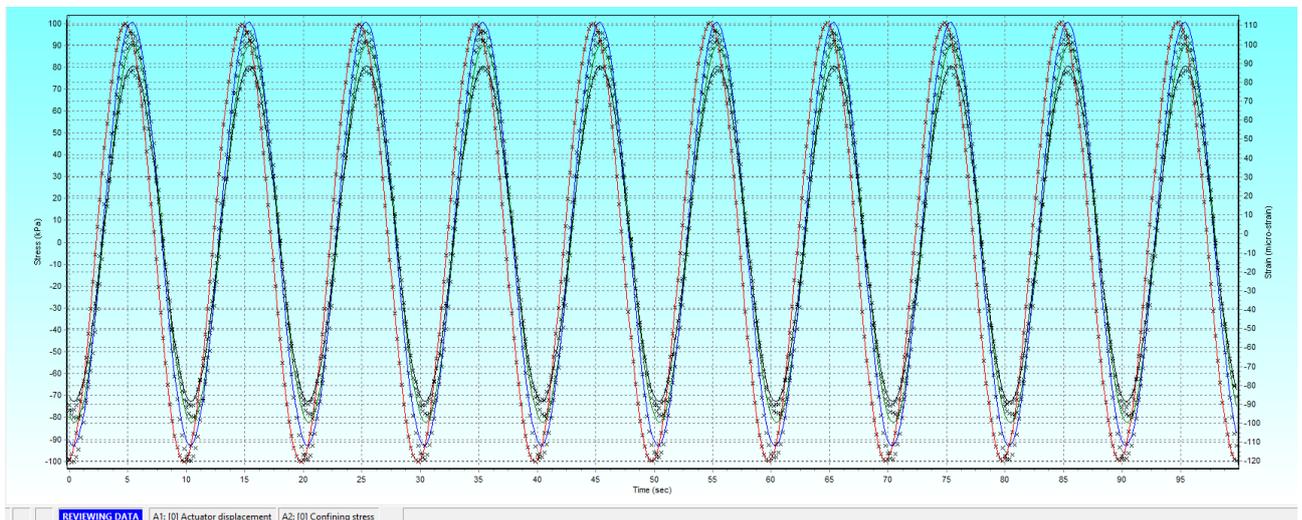


Figura 53 Curve sinusoidali della prova.

Le curve sinusoidali generate sullo schermo devono essere continue e prive di frastagliature, altrimenti potrebbe esserci un errore nell'incollaggio dei dadi o dei trasduttori.

Durante la prova è importante controllare il "load standard error" per assicurarsi che non superi il 10%. Inoltre, il software è in grado di calcolare in tempo reale il modulo dinamico e l'angolo di fase per ogni frequenza di carico, plottando i valori su un grafico. Per garantire un controllo accurato durante la prova, è necessario verificare che il valore del modulo decresca all'aumentare della frequenza mentre l'angolo di fase aumenti [20,21].

Curve maestre

Dopo aver effettuato la misura del modulo dinamico a diverse frequenze e temperature, è necessario rappresentare i dati su un grafico noto come curva maestra. La costruzione di questa curva si basa sul principio di equivalenza tempo-temperatura, il quale mette in relazione la frequenza di carico, il tempo e la risposta del campione. La rigidità del conglomerato bituminoso varia in base a questi fattori, infatti al diminuire della frequenza e all'aumentare della temperatura, il modulo diminuisce e il comportamento diventa viscoso, mentre al diminuire della temperatura e all'aumentare della frequenza, il modulo dinamico aumenta e il comportamento diventa rigido.

Le curve maestre rappresentano la risposta del materiale a una determinata temperatura di riferimento. Per costruire una curva maestra sono necessari i dati del modulo dinamico a diverse temperature. In pratica, i dati sperimentali possono essere considerati come segmenti di una stessa curva, spostati lungo l'asse delle frequenze per effetto della temperatura, utilizzando il principio di equivalenza tempo-temperatura. Lo spostamento viene effettuato mediante un parametro di traslazione denominato "shift-factor", che rappresenta il rapporto tra le due frequenze in cui il modulo assume lo stesso valore, ma a temperature differenti. Il parametro consente di sovrapporre porzioni di curva a temperature diverse lungo l'asse delle frequenze in modo che i valori di modulo che coincidono si sovrappongano [20,21].

La temperatura a cui dobbiamo riferirci per le curve maestre è di 20°C e, in questo lavoro di tesi, è stata utilizzata questa temperatura come riferimento. Per svolgere la modellazione dobbiamo riferirci alla normativa AASHTO PP 61-13, la quale si basa sulla modellazione definita nel Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Queste norme descrivono come costruire la curva maestra attraverso un modello sigmoidale, che valuta i moduli in funzione di una frequenza ridotta, definita come la frequenza riferita alla temperatura di riferimento equiparabile alla vera frequenza di carico della prova per una certa temperatura [20,21].

L'AASHTO PP 61-13, determina lo shift-factor tramite 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;
- ΔE_a è l'energia di attivazione (parametro);
- T è la temperatura di prova;
- T_r è la temperatura di riferimento (20°C)

Ora sarà possibile identificare anche la frequenza ridotta rispetto a cui saranno riferiti i valori di modulo traslati, in base logaritmica. Essa sarà pari alla somma del logaritmo della frequenza alla temperatura della prova e dello 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.

Per la costruzione della curva maestra si utilizza una funzione sigmoide leggermente diversa dell'equazione definita da MEPDG:

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

Dove:

- $|E^*|$ è il modulo dinamico;
- Max è il logaritmo del valore dell'asintoto vetroso ($|E^*|_{max}$);
- γ è la pendenza della curva nel suo punto di flesso;
- β è il valore di frequenza ridotta per il punto di flesso della curva;

- δ è l'intercetta della curva con l'asse y.

I parametri del modello sono stati definiti attraverso un'ottimizzazione numerica che utilizza il principio dei minimi quadrati. Per fare ciò, è stato utilizzato il risolutore di Excel, che ha cercato la combinazione di parametri per cui la somma dei quadrati delle differenze tra i valori del modulo dinamico misurati e quelli predetti dalla funzione sigmoideale fosse minima. Durante l'ottimizzazione, è stato considerato importante definire l'asintoto orizzontale superiore come parametro del modello, sempre tramite risolutore Excel, in quanto rappresenta il limite vetroso del conglomerato bituminoso.

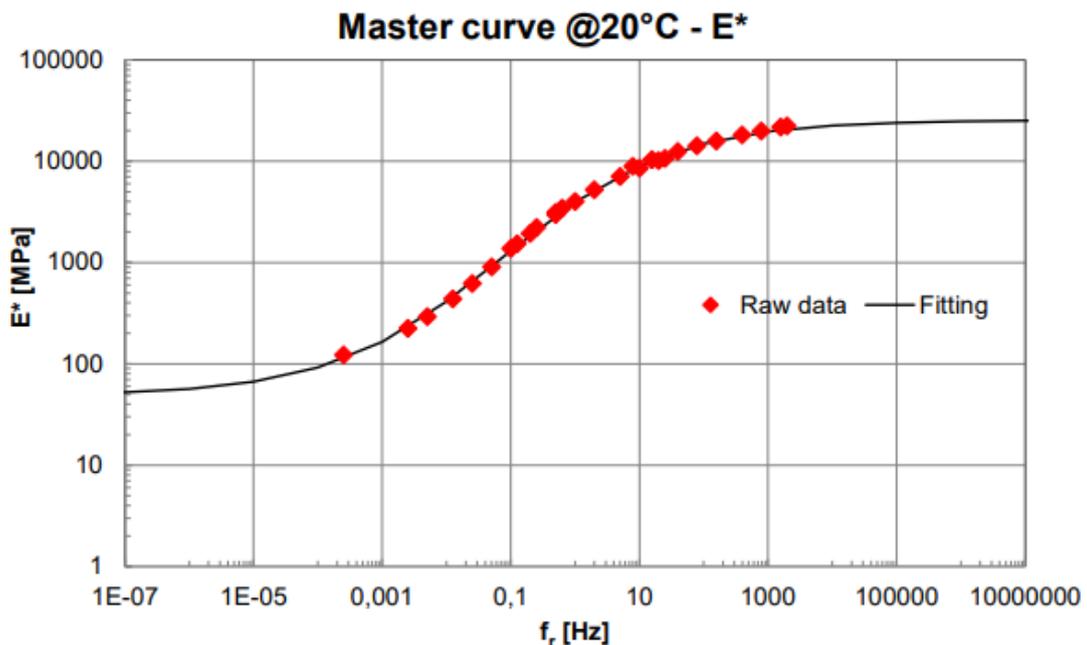


Figura 54 Esempio di curva maestra.

4.4. Flow number

Il test di Flow Number è una variazione del test di deformazione permanente a carico ripetuto che è stato utilizzato dai ricercatori per misurare il potenziale di rutting delle miscele di conglomerato bituminoso. Il rutting, in italiano ormaiamento, è uno dei principali fenomeni di degrado strutturale che colpisce le pavimentazioni. Si tratta della formazione di solchi sulla superficie, causati dal continuo passaggio dei veicoli [22]. Questi solchi sono generati dall'accumulo di deformazioni permanenti, poiché il conglomerato bituminoso è un materiale viscoelastico il cui comportamento è influenzato dalla temperatura, soprattutto quando questa raggiunge valori elevati.

In questo studio sperimentale per determinare le deformazioni permanenti abbiamo utilizzato il flow number test. Quest'ultimo, pur essendo distruttivo in quanto porta alla rottura del campione, permette di valutare le deformazioni permanenti accumulate in funzione dei cicli di carico, nonché il tasso di deformazione.

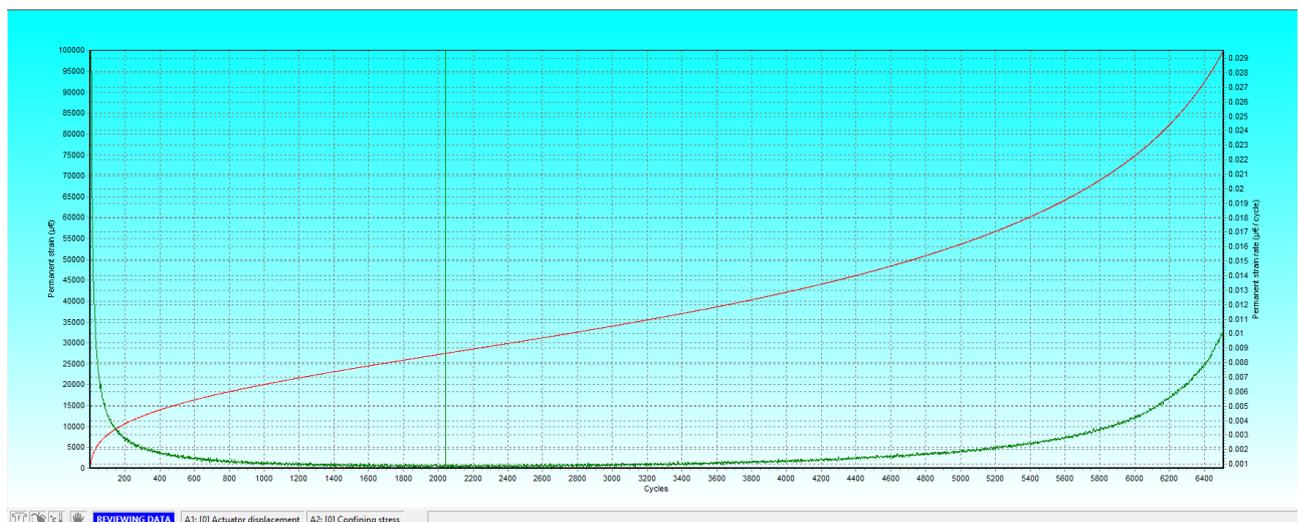


Figura 55 Esempio grafico del flow number.

Il carico che viene applicato in questo test è di tipo uniaassiale, ciclico, e in ogni ciclo completo abbiamo 0,1 secondi di carico e 0,9 secondi di riposo con frequenza di 1 Hz. Questo processo è in grado di misurare le deformazioni permanenti cumulate e in contemporanea plottare a grafico i risultati.

Essi mostrano un comportamento generale composto da tre regioni:

- All'inizio della prova il tasso di deformazione decresce molto rapidamente con l'aumentare del numero di cicli (fase sinistra della figura 53);
- Nella seconda fase, all'aumentare dei cicli il tasso di deformazione resta pressoché costante (fase centrale della figura 53);
- Nell'ultima fase si ha una crescita nel tasso di deformazione in cui il materiale viene portato velocemente a rottura (fase destra della figura 53).

Il flow-number rappresenta il numero di cicli che definisce la zona di transizione tra la fase secondaria e l'ultima, ed è determinato individuando il momento in cui il tasso di deformazione raggiunge il valore minimo [22].

Per la definizione del flow-number, sono stati adoperati i campioni precedentemente utilizzati per la misura del modulo dinamico e la costruzione delle curve maestre, previa rimozione dei dadini porta-trasduttori. La prova è stata condotta mediante l'utilizzo dell'UTM-30, utilizzando la modalità di prova specifica per il flow-number.

La prova si articola nei seguenti passaggi:

Preparazione prova

La configurazione del campione in questa prova è molto semplice. Mettiamo quest'ultimo al centro del piatto superiore e inferiore di contenimento, che erano stati separati precedentemente da dei dischi in lattice. In seguito, il campione va posizionato al centro della traversa all'interno della UTM-30, in modo che l'attuatore si trovi al centro del piatto superiore. Sia il campione che la cella sono stati condizionati alla temperatura di 55°C. Il campione è stato condizionato per 12 ore, mentre la cella è stata condizionata nelle 3 ore precedenti alla prova.



Figura 56 Campione in configurazione di prova.

Inserimento parametri

L'esecuzione di questa prova avviene tramite ausilio di un programma dove all'interno è essenziale inserire una serie di parametri definiti dalla normativa AASHTO T 378-17:

- Dimensione del campione (altezza e diametro);
- Temperatura di prova 55°C;
- Intensità della tensione assiale ripetuta di 600 kPa;
- Sforzo di contatto pari al 5% dello sforzo assiale (30 kPa);
- Deformazione assiale permanente massima consentita pari a 100000 microstrain;
- Numero di cicli di carico massimo consentito uguale a 10000.

UTS UTS005 2.06 AMPT Flow Test - FlowWET_POLITO.D005

File Run Options View Help






General Setup and Control Test results Chart options Wave shape and Tuning

Specimen information

Identification: WET_POLITO

Conditioning: OVERNIGHT

Remarks:

Dimensions	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			94.0	0.000
Height (mm)	129.2	130.0	130.0	129.9			129.8	0.386

Cross-sectional area (mm²): 6939.8

Test parameters

Target test temperature (°C): 55 (°F): 131.0

Contact stress (kPa): 30 (psi): 4.35

Target confining pressure (kPa): 0 (psi): 0.00

Deviator stress (kPa): 600 (psi): 87.02

Enable runtime data capture

Termination parameters

Maximum microstrain: 100000

Test duration (cycles): 10000

Figura 57 Interfaccia software inserimento dati.

Esecuzione della prova

Una volta inseriti tutti i parametri, la prova può essere avviata. Questa è di tipo distruttivo e quindi, una volta terminata si potrà notare una diminuzione in altezza con leggero spanciamento laterale, e i campioni non possono essere usati per altri test. Se avviene lo spanciamento del campione senza diminuzione dell'altezza, allora la rottura non è accaduta a causa delle deformazioni permanenti.

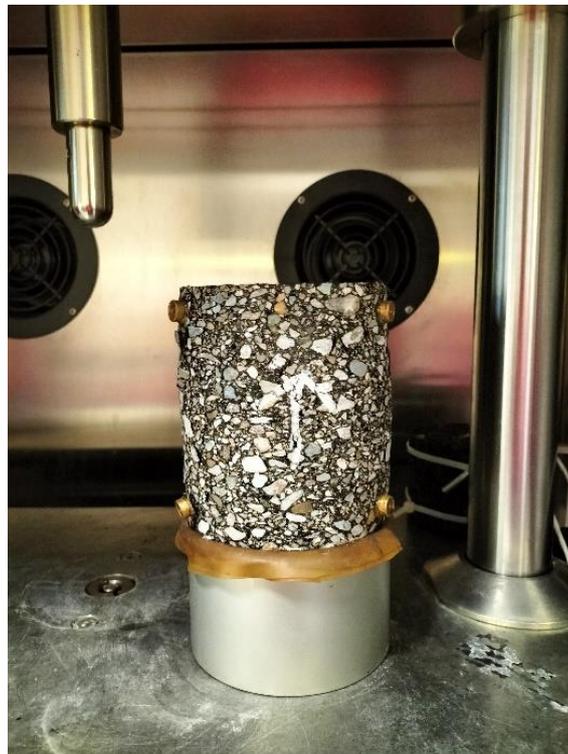


Figura 58 Campione al termine della prova.

Il valore di flow number si definisce a partire dall'incremento di deformazione permanente per mezzo del modello di Francken, circoscritto dall'accoppiamento di una legge di potenza con una funzione esponenziale:

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

Dove:

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

Il flow number viene calcolato collocando l'annullamento della derivata seconda al modello di Francken, però prima bisogna andare a definire dei parametri di controllo attraverso un processo di ottimizzazione numerica.

5. Analisi dei dati

In questo capitolo andremo a confrontare i risultati ottenuti dalle prove svolte, nelle modalità illustrate in precedenza, in particolare il confronto si è svolto analizzando 4 miscele, due per tecnologia di addizione dei polimeri.

In prima battuta mostreremo i risultati e i relativi grafici riguardanti l'analisi compositiva delle miscele in esame, in seguito passeremo alle caratteristiche meccaniche. I risultati ottenuti saranno confrontati con le specifiche normative di settore e con i dati provenienti da studi precedenti.

5.1. Analisi delle caratteristiche compositive e volumetriche

L'analisi che segue è fondamentale per intuire le caratteristiche proprie della composizione dei materiali, e per avere un confronto tra conglomerati di tipo "wet" e "dry" più congruo possibile. Andiamo inoltre a scoprire le caratteristiche volumetriche post compattazione con pressa a taglio girevole.

5.1.1. Analisi del contenuto di legante

Come definito nel capitolo precedente, la prova è stata eseguita con forno carbolite tramite ignizione. Abbiamo aggiunto circa un chilo di miscela per ognuna delle prove, previa separazione nei due cestelli. Al termine della combustione, circa trenta minuti, è possibile calcolare la percentuale di bitume della miscela tramite la differenza di peso del materiale.

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. Per ogni miscela è stato ripetuto il test almeno due volte, ed in seguito è stata fatta la media.

Di seguito i valori:

MISCELA	$%B_{MIX}$	$%B_{AGG}$	$%B_{MIX-NETTO}$
WET_1	5,69	6,19	5,34
WET_2	5,97	6,35	5,05
DRY_1	5,40	5,93	5,62
DRY_2	5,91	6,28	5,56

Tabella 2 Percentuali di bitume delle miscele in esame.

Per una più precisa valutazione abbiamo effettuato delle prove con solo polimeri e solo fibre, inserite nei cestelli, per quantificare la loro perdita in peso e calcolarci il $%B_{MIX-NETTO}$, che equivale alla sola percentuale di bitume tal quale, e quindi senza nessuna addizione. Di conseguenza il $%B_{MIX}$ è il rapporto in peso tra il bitume, con polimeri e fibre, e la miscela finale (aggregati e bitume modificato). Mentre la $%B_{AGG}$ è il rapporto in peso tra il bitume modificato e gli aggregati senza legante.

I limiti del capitolato per quanto riguarda lo strato di usura, di nostro interesse, sono riferiti alla $%B_{AGG}$ e vanno dal 5,00 al 6,50.

Infine, possiamo affermare che tutte le miscele rispettano il Capitolato Speciale d'Appalto per quanto riguarda la percentuale di legante, e tutte risultano essere confrontabili tra loro.

5.1.2. Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è un procedimento che utilizza la vagliatura per determinare la distribuzione dimensionale degli aggregati. In un conglomerato bituminoso, l'obiettivo è ottenere la massima densità possibile utilizzando la maggior quantità di aggregati. Questo obiettivo viene raggiunto utilizzando granuli di dimensioni diverse, in modo che i granuli più piccoli possano penetrare nei vuoti lasciati da quelli più grandi.

Per condurre l'analisi granulometrica, vengono utilizzati setacci con dimensioni standardizzate. Il test viene condotto sugli aggregati lavati ed asciugati a 105°C provenienti dalla prova di ignizione [15].

Per il confronto tra le miscele abbiamo deciso di procedere analizzando insieme la miscela "WET_1" e "DRY_1", entrambe forniteci dall'impianto 1, e nel secondo confronto abbiamo analizzato la miscela "DRY_2", giunta al nostro laboratorio dall'impianto 2, con la "WET_2" realizzata nel nostro laboratorio per svolgere questo studio sperimentale. Per ogni singola miscela sono state effettuate due setacciature distinte, e successivamente mediati i valori. Di seguito il primo confronto:

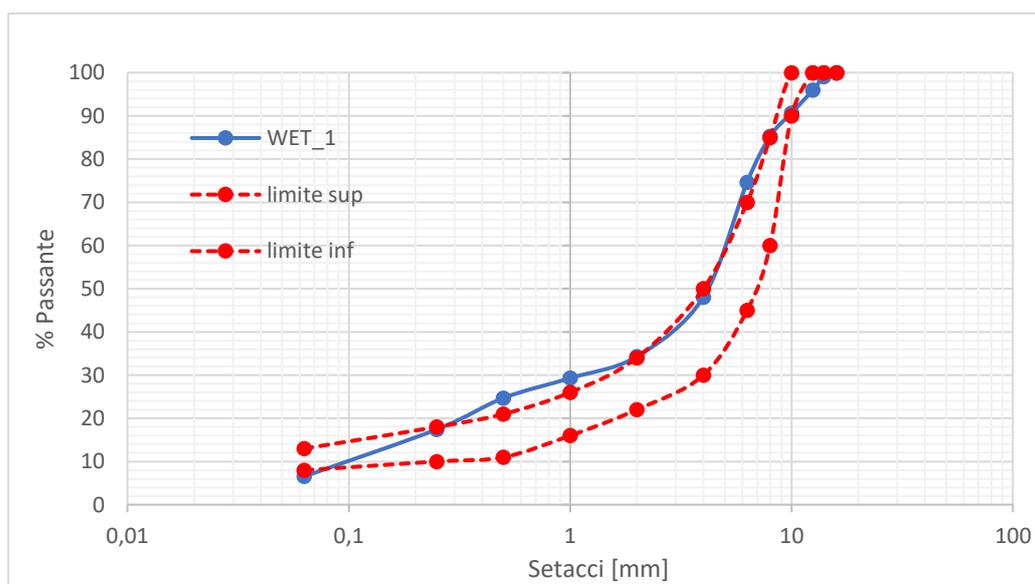


Grafico 1 Curva granulometrica miscela WET_1.

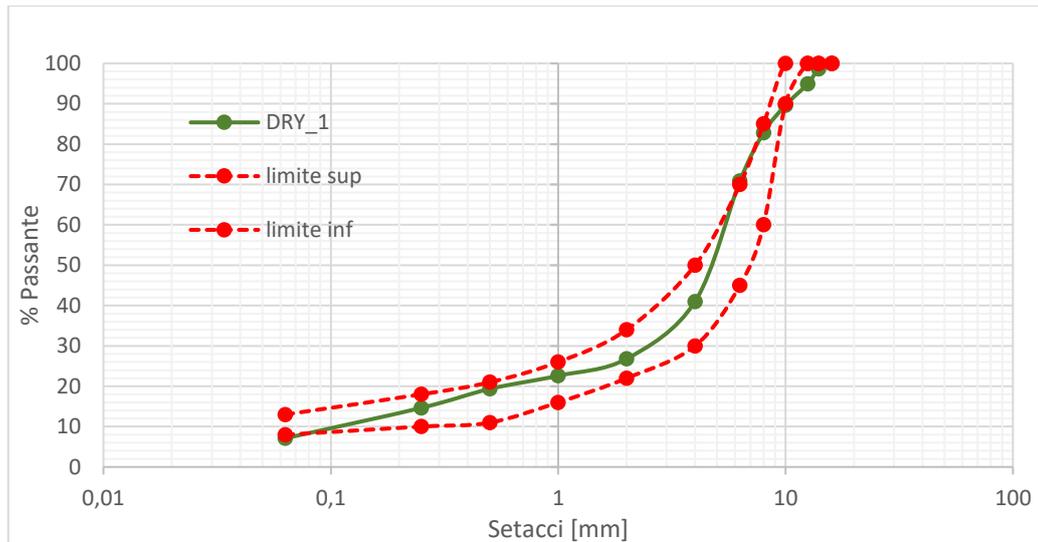


Grafico 2 Curva granulometrica miscela DRY_1.

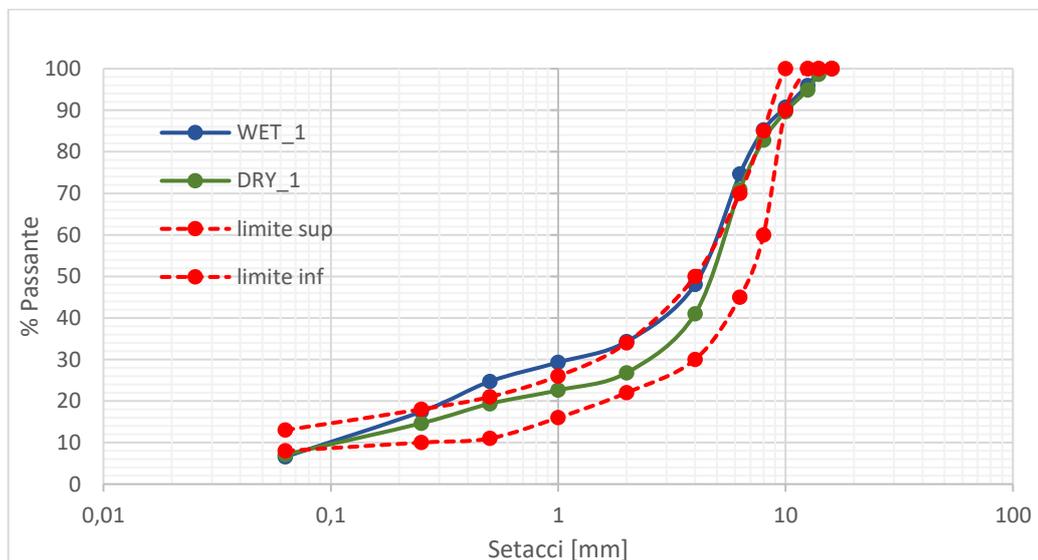


Grafico 3 Curve granulometriche confronto 1

La riproduzione dello scheletro litico si verifica su un piano semi-logaritmico dove sull'asse delle ascisse troviamo le aperture dei setacci in mm, mentre sull'asse delle ordinate il passante progressivo in termini percentuali. Osservando le curve del grafico 3, nel primo confronto si nota che entrambe non si discostano in maniera eccessiva dai limiti di riferimento forniti dall'impianto 1, seppur in alcuni punti della miscela "WET_1" la rispettiva curva granulometrica va oltre il limite superiore. Il contenuto di filler minerale è leggermente al di sotto del limite inferiore per entrambe le miscele. Si può notare come effettivamente ci sia uno spostamento verso l'alto soprattutto nei setacci da 0,5mm e 1mm, la miscela "DRY_1" resta comunque all'interno dei limiti. In complesso è migliore nella distribuzione dei grani la miscela realizzata con tecnologia "dry", non discostandosi però di molto dalla controparte "wet".

In seguito, i grafici del secondo confronto:

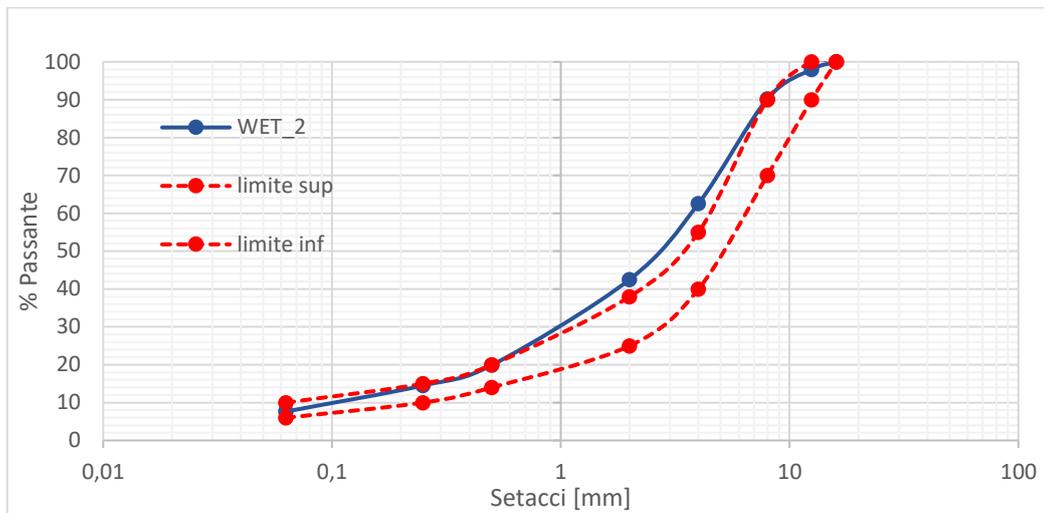


Grafico 4 Curva granulometrica miscela WET_2.

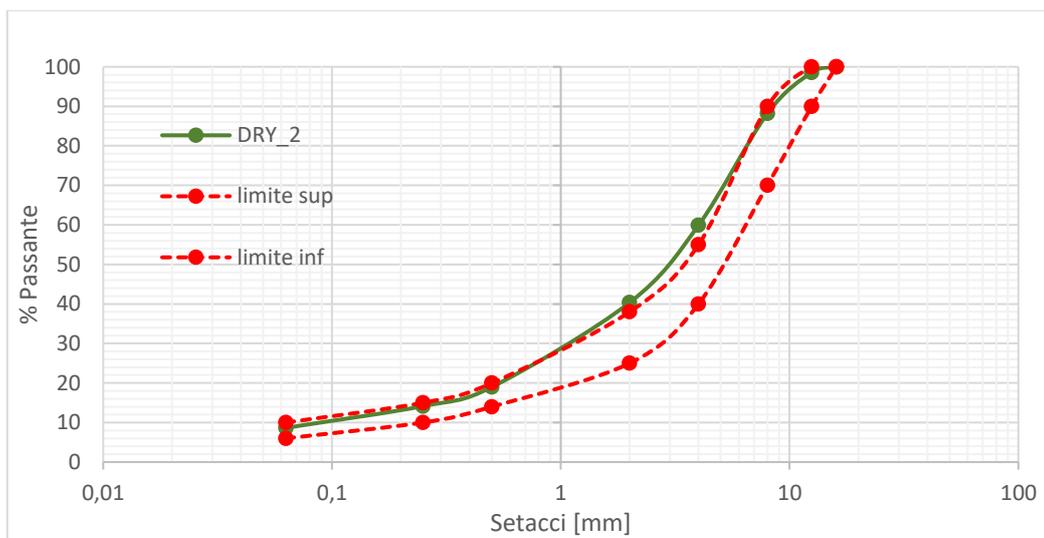


Grafico 5 Curva granulometrica miscela DRY_2

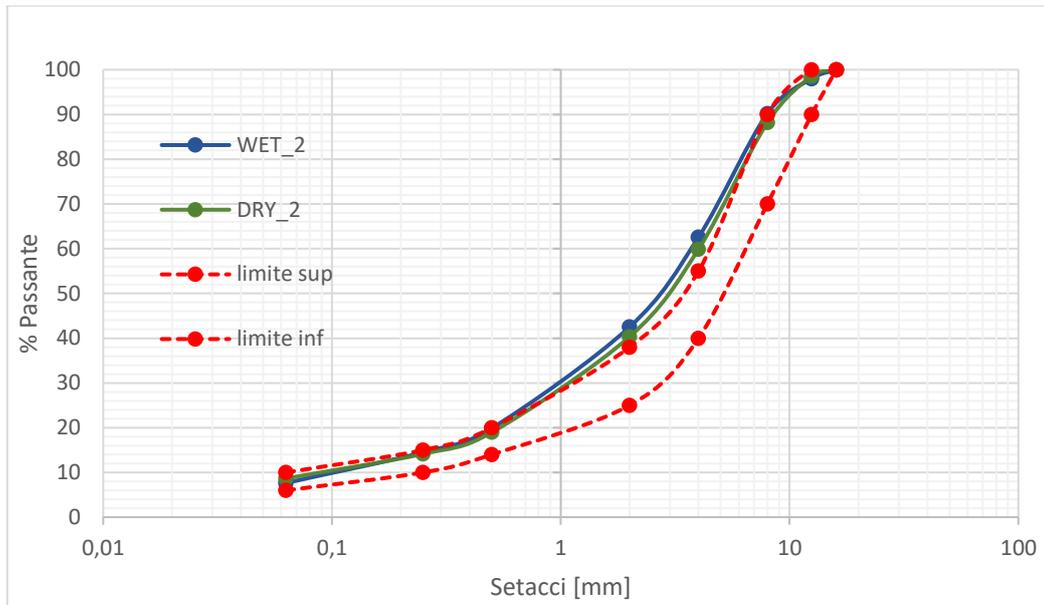


Grafico 6 Curve granulometriche confronto 2.

Osservando il grafico 6, possiamo notare subito che le miscele si discostano pochissimo tra loro, abbiamo riprodotto con molta precisione la ricetta granulometrica della miscela “DRY_2” per la miscela “WET_2” nel nostro laboratorio. I limiti riportati in questo secondo confronto sono relativi al Capitolato Speciale d’Appalto nel dettaglio riferiti allo strato di usura.

Possiamo osservare come entrambe le miscele valichino il limite superiore nei setacci da 2mm e 4mm, ma è irrilevante ai fini del nostro obiettivo centrale. Abbiamo preferito riprodurre una miscela (“WET_2”) tanto più simile alla “DRY_2” in modo tale da analizzare e confrontare le differenze in termini di prestazioni meccaniche.

5.1.3. Analisi MMVT

Nel confronto tra le miscele si è considerata anche la massima densità teorica. Questo valore non è però un parametro reale, ma è necessario per la successiva caratterizzazione volumetrica delle miscele, per definire la quantità di materiale da inserire nelle fustelle per la compattazione con la pressa giratoria. Tuttavia, non si analizza il ruolo della massima densità teorica dal punto di vista fisico, poiché le variazioni nella composizione granulometrica e nella percentuale di bitume delle diverse miscele sono molto importanti. Infatti, il valore di densità che si avrebbe in assenza di vuoti dipende anche dallo scheletro litico presente nella miscela. In generale, si osserva un aumento della massima densità teorica al diminuire del contenuto di bitume.

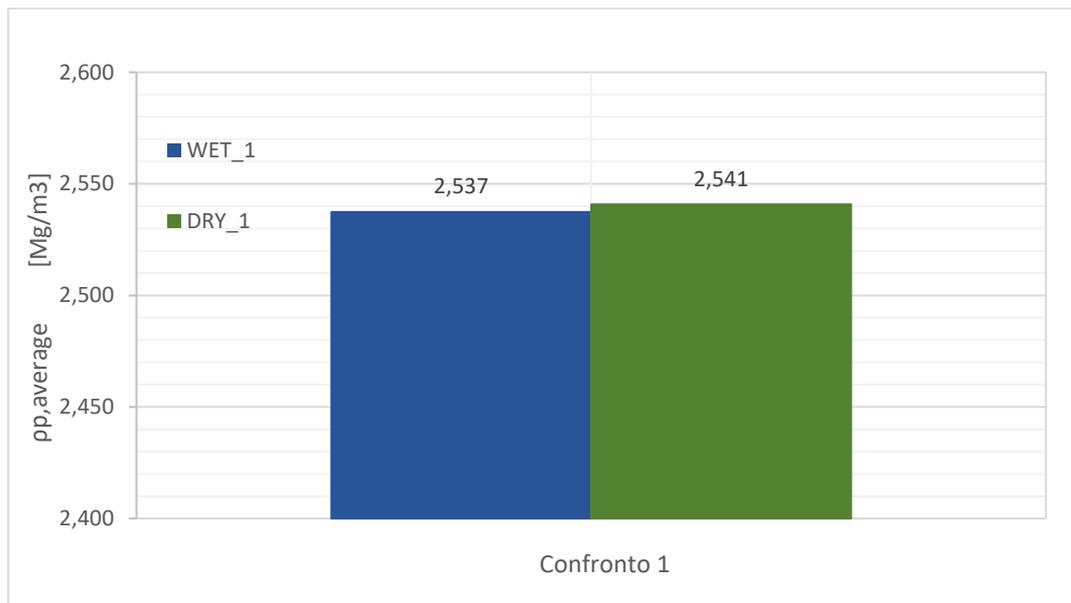


Grafico 7 Massima Massa Volumica Teorica confronto 1.



Grafico 8 Massima Massa Volumica Teorica confronto 2.

Vengono mostrate attraverso degli istogrammi le variazioni di MMVT delle miscele da noi analizzate, possiamo notare come le miscele hanno una massima massa volumica teorica che differisce tra loro di valore davvero irrisorio, nell'ordine di 10^{-5} . Possiamo affermare che i valori sono tra loro perfettamente simili e adatti al confronto.

5.1.4. Compattazione con pressa a taglio giratorio

La compactazione con pressa a taglio giratorio è una specifica richiesta del Capitolato Speciale d'Appalto, per di più tramite le curve di compactazione possiamo notare eventuali differenze tra le miscele wet e dry. Infatti, è richiesto che vengano realizzati campioni alla temperatura di compactazione pari a 160°C.

Nel corso del lavoro di laboratorio, per la stesura di questa tesi, si sono realizzati per ogni miscela esaminata tre campioni di diametro 100 mm compactati con un numero di giri pari a 240.

Grazie a quest'ultimi abbiamo ottenuto le curve di compactazione, pratici per valutare la lavorabilità e la capacità di addensamento dei conglomerati bituminosi, e sono state calcolate successivamente le percentuali di vuoti a 10, 120 e 240 giri. I vuoti a 240 giri sono ottenuti dalla relazione tra la massa volumica reale con la MMVT, mentre i vuoti a 10 e 120 giri direttamente dai dati di altezza registrati dalla pressa a taglio giratorio.

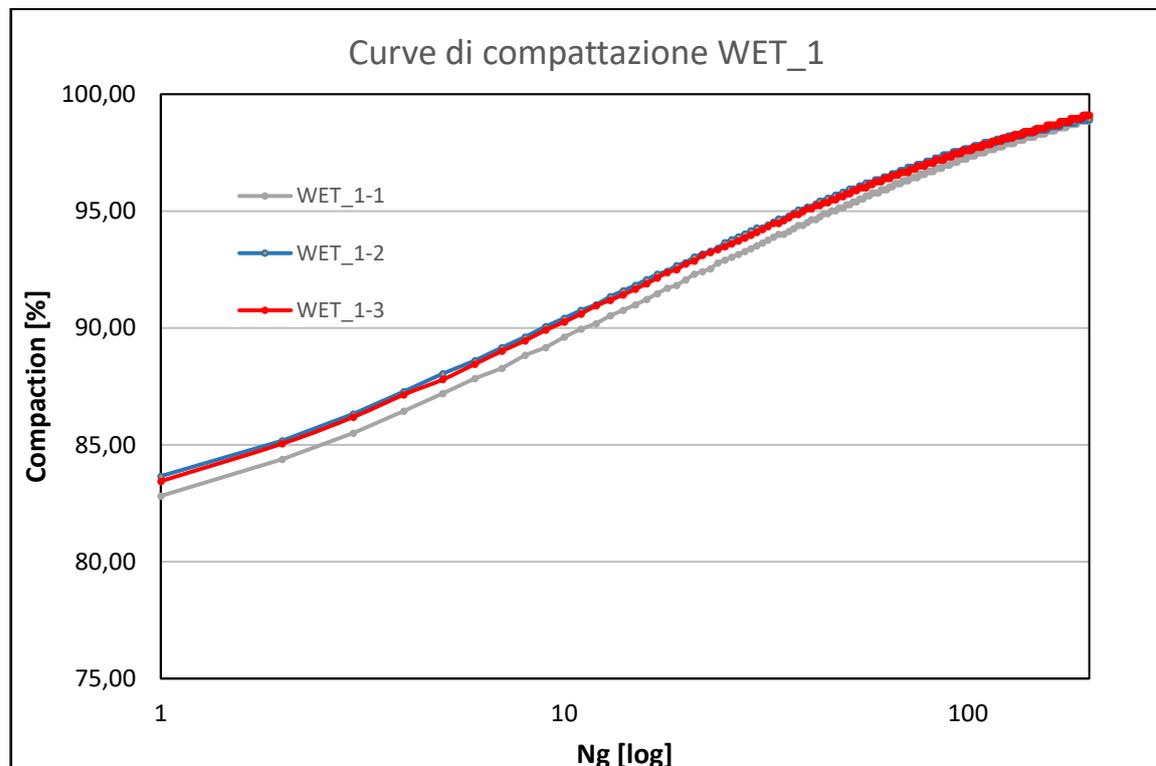


Grafico 9 Curve di compactazione miscela WET_1.

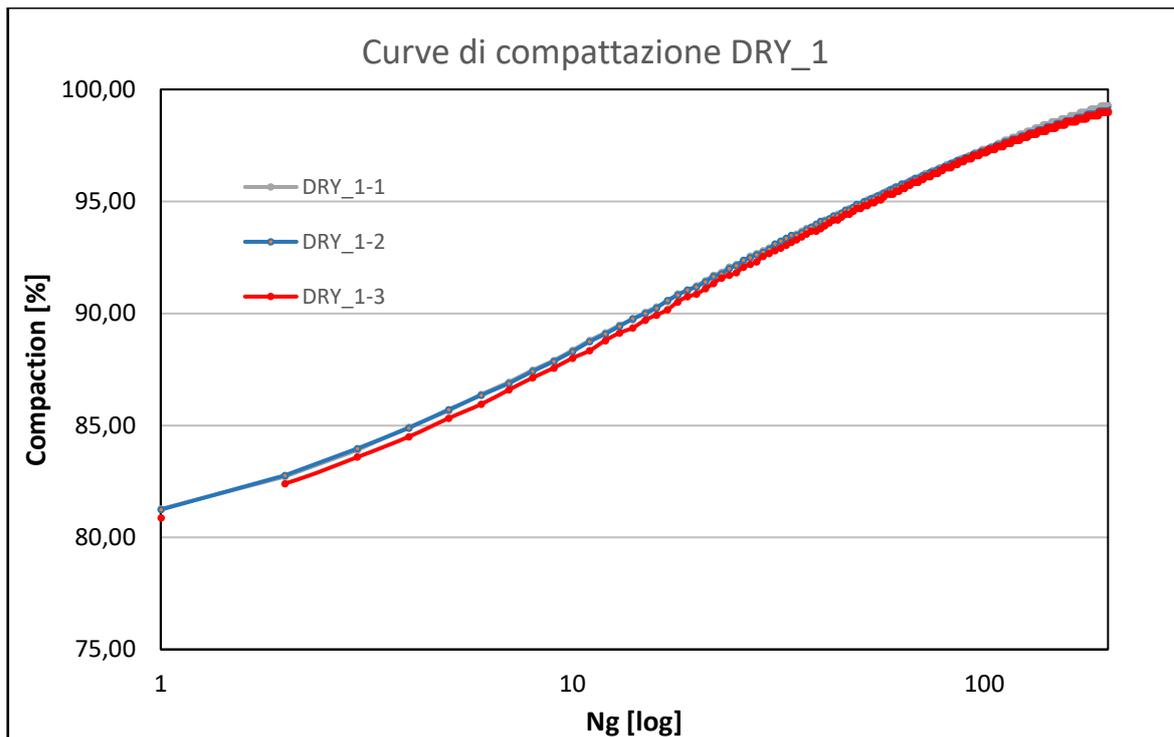


Grafico 10 Curve di compattazione miscela DRY_1.

I dati raccolti in continuo dalla pressa giratoria durante il graduale addensamento del conglomerato bituminoso sono stati elaborati per ottenere tre parametri fondamentali per valutare la sua idoneità alla posa in opera. Questi parametri sono: addensabilità, lavorabilità e contenuto di vuoti residui alla fine della compattazione.

Durante il processo di compattazione con la pressa giratoria, sono stati registrati i dati relativi all'altezza media del materiale sottoposto a compressione all'interno della fustella in funzione del numero di giri. La rielaborazione di questi dati ha permesso di ottenere delle curve di addensamento, dalle quali è stato possibile controllare le relative caratteristiche volumetriche.

In sintesi, le curve di compattazione ottenute dalla pressa giratoria sono un importante strumento di valutazione dell'idoneità del conglomerato bituminoso alla posa in opera. La raccolta e l'elaborazione dei dati relativi all'addensabilità, alla lavorabilità e al contenuto di vuoti residui permettono di controllare le caratteristiche volumetriche del materiale e garantire le prestazioni desiderate nella pavimentazione [16].

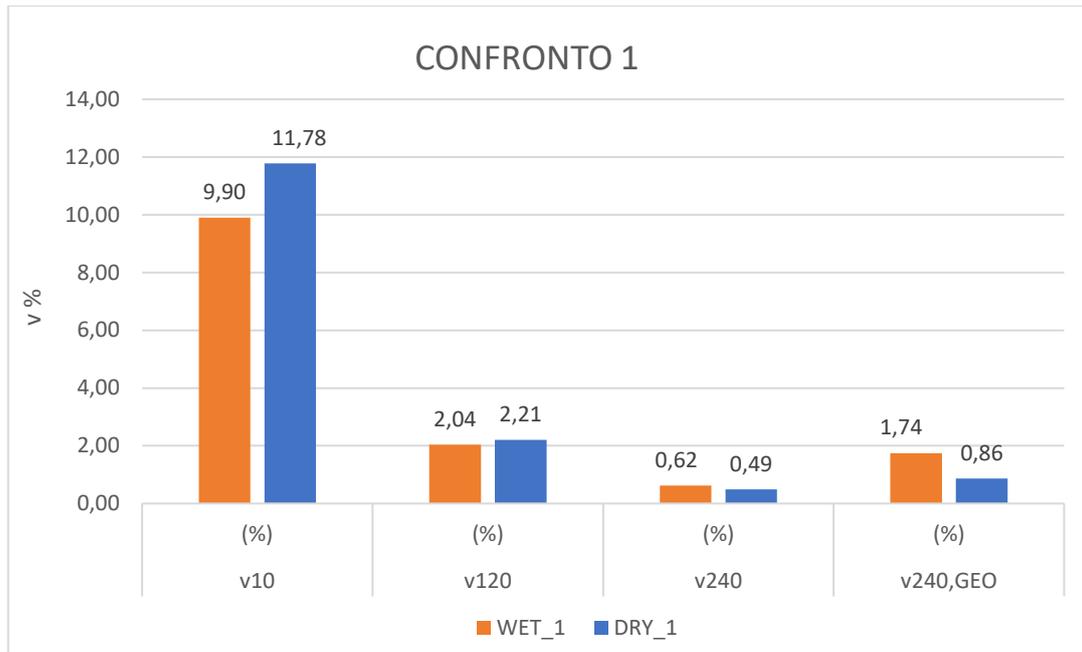


Grafico 11 Confronto 1 percentuali dei vuoti a 10,120,240 giri.

Il grafico 11 espone degli istogrammi riassuntivi dei valori di percentuale di vuoti per le due miscele analizzate attraverso il primo confronto. Sull'asse delle ascisse ci sono rappresentate le due miscele esaminate, in base al numero di giri di compattazione della pressa giratoria, mentre sull'asse delle ordinate ci sono i valori percentuali di vuoti.

Si denota come inizialmente il conglomerato prodotto con tecnologia wet risulti avere una percentuale di vuoti di quasi due punti percentuali nei 10 giri iniziali, ma si nota subito che questo divario diminuisce di molto quando ci troviamo nei 120 giri. Al termine della compattazione i due materiali hanno percentuali di vuoti molto basse, ma restano comunque ben confrontabili tra loro a livello meccanico.

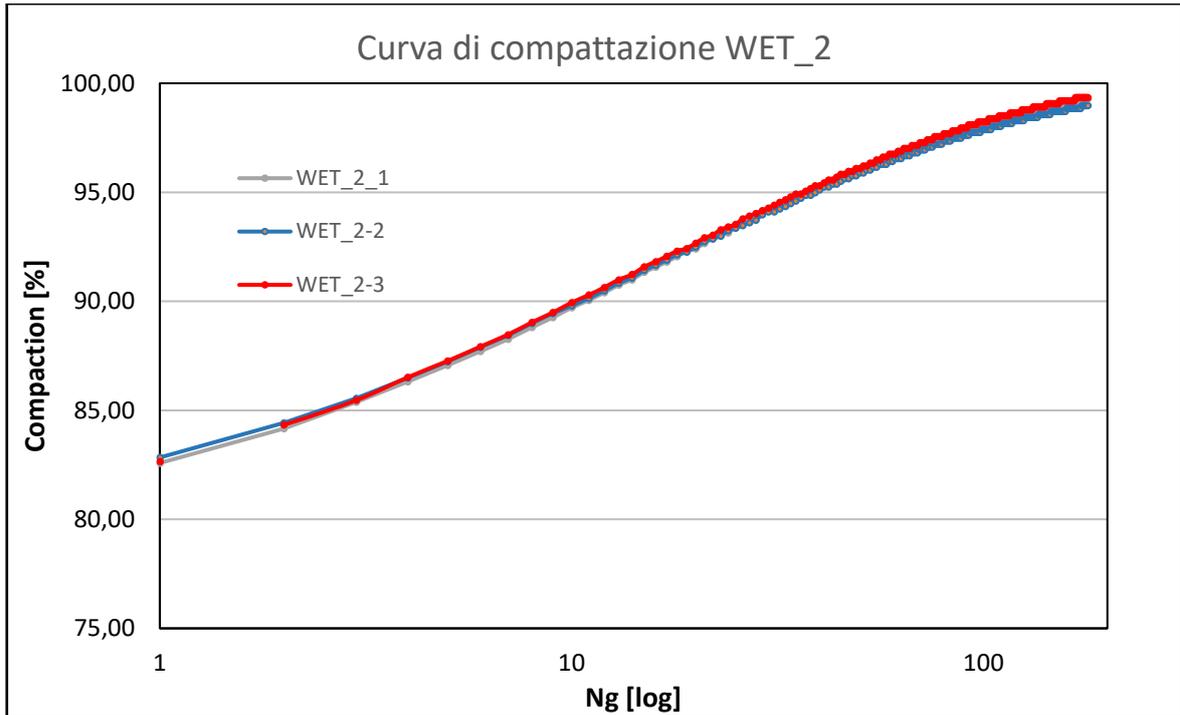


Grafico 12 Curve di compattazione WET_2.

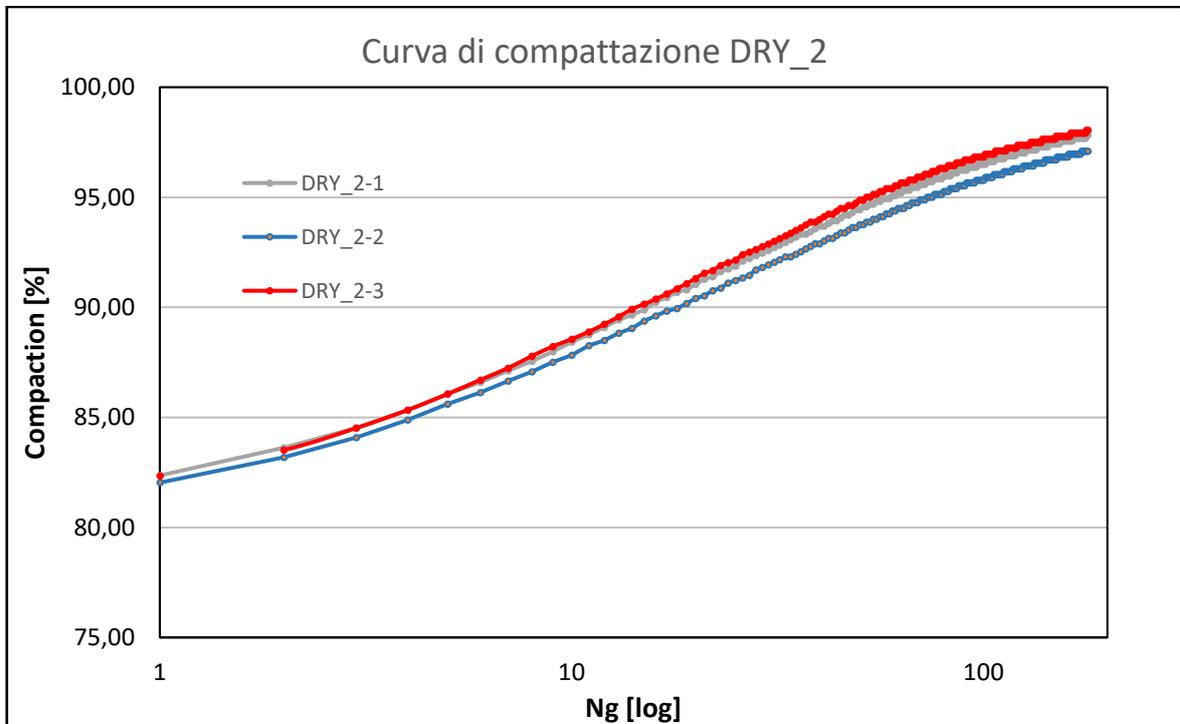


Grafico 13 Curve di compattazione DRY_2.

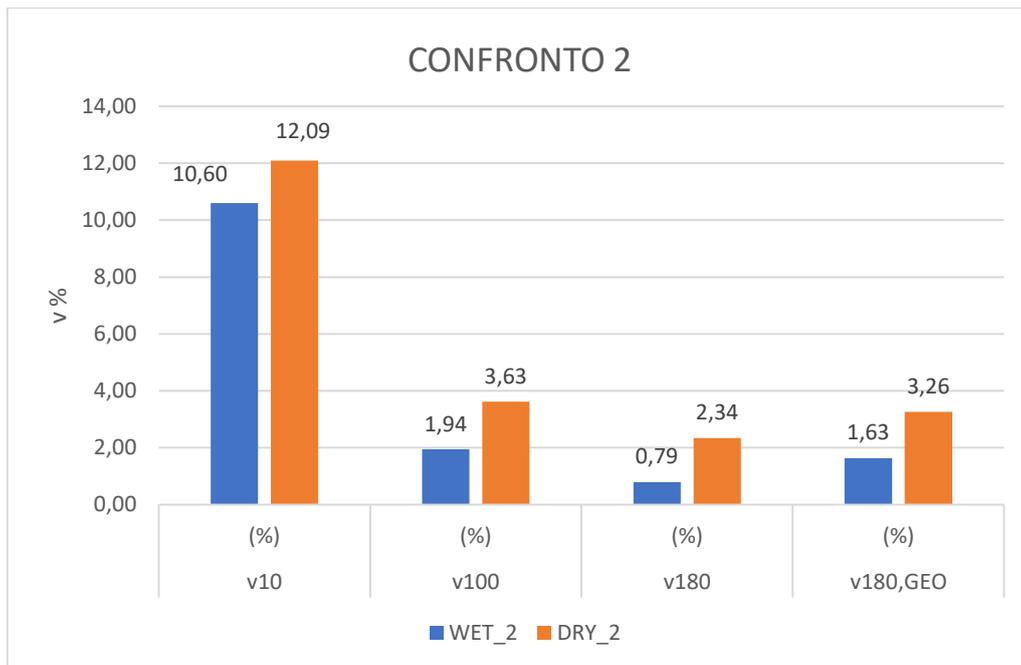


Grafico 14 Confronto 2 percentuali dei vuoti a 10,120,240 giri.

In questo secondo confronto nel grafico 14 abbiamo utilizzato dei dati già determinati in laboratorio per quanto riguarda la miscela DRY_2, ed abbiamo di conseguenza compattato la miscela da noi composta WET_1 non più a 240 giri totali ma a 180 giri totali con la stessa pressione di 600kPa, tutto questo per verificarne le caratteristiche meccaniche adatte alla comparazione. Dalla compattazione si deduce che il conglomerato prodotto con tecnologia wet abbia in tutte le fasi di compattazione intorno ai 2 punti percentuali di vuoti in meno rispetto all'analoga miscela dry.

Nella valutazione delle proprietà di una miscela, ci sono anche altri due parametri che forniscono informazioni dettagliate sulla sua composizione: il VMA e il VFB.

Il VMA, rappresenta tutti i vuoti che sono presenti nella miscela, quindi la somma dei vuoti della miscela compresi quelli riempiti dal bitume effettivo. Questo parametro è importante perché influenza la resistenza meccanica della miscela stessa. Il campione esaminato deve avere una quantità di vuoti da permettere al bitume di creare un film sufficientemente spesso sulla superficie di ogni aggregato. Questa pellicola protettiva non solo garantisce una maggiore connessione degli elementi della miscela, ma aumenta anche le prestazioni meccaniche della pavimentazione.

Al contempo, un contenuto eccessivo di vuoti potrebbe causare problemi legati al fenomeno della fatica, oltre ad un accumulo di deformazioni permanenti superiore a quello desiderato. Per questo

motivo, trovare la combinazione corretta tra VMA e VFB è fondamentale per ottenere le caratteristiche richieste dalla pavimentazione.

In sintesi, analizzare il VMA e il VFB permette di ottenere informazioni dettagliate sulla composizione della miscela, garantendo allo stesso tempo una pavimentazione resistente e duratura. Trovare il giusto equilibrio tra questi due parametri è essenziale per raggiungere l'obiettivo di una pavimentazione efficiente e sicura [17].

Di seguito si riportano e analizzano i risultati in termini di VMA e VFB per ogni miscela analizzata:

CONFRONTO	MISCELA	VMA [%]	VFB [%]
1	WET_1	14,4	95,7
	DRY_1	14,1	96,5
2	WET_2	15,2	94,8
	DRY_2	16,6	85,9

Tabella 3 Contenuti di VMA e VFB delle miscele analizzate.

Osservando i valori in tabella 3, si può affermare che il valore di VMA di tutte le miscele esaminate è pressoché costante, mentre nella miscela DRY_2 abbiamo un valore di VFB che si discosta un po' dagli altri. Correlando i dati in tabella con i grafici inerenti ai vuoti, si può affermare che il contenuto di VFB in tutte le miscele è eccessivo rispetto al corrispettivo valore di VMA, potendo portare a problematiche legate alle deformazioni permanenti come l'espulsione di bitume sotto carico.

5.2. Analisi delle caratteristiche meccaniche

La visualizzazione dei risultati delle prove avverrà mediante l'impiego di grafici e tabelle specifiche, in grado di fornire un'accurata rappresentazione delle prestazioni dei campioni analizzati. Procediamo ora con l'esame dei risultati delle prove meccaniche per una valutazione dettagliata delle caratteristiche dei materiali in confronto.

5.2.1. Analisi di resistenza a trazione indiretta

Nel primo confronto abbiamo analizzato le miscele WET_1 e DRY_1, post compattazione con pressa a taglio giratorio, con modalità impostata a numero di giri pari a 240, con carico di 600kPa. La prova è stata svolta seguendo la normativa UNI EN 12697-23, quindi utilizzando almeno 3 campioni per miscela analizzata. Il test è stato svolto quindi ad una temperatura di 25°C, dopo aver condizionato i campioni alla medesima temperatura per almeno 2h prima della prova.

La velocità di avanzamento del carico è stata 50 ± 2 mm/min [18].

Di seguito le tabelle relative alla percentuale di vuoti, ai valori di RTI (Resistenza Trazione Indiretta), ai valori di CTI (Coefficiente di Trazione Indiretta) ed il grafico relativo alla prova:

WET_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
WET_1-1	0,72	1,83	192,77
WET_1-2	0,67	1,81	161,07
WET_1-3	0,48	1,92	243,44

Media	0,62	1,85	199,09
--------------	-------------	-------------	---------------

DRY_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
DRY_1-1	0,32	1,44	169,29
DRY_1-2	0,55	1,50	212,73
DRY_1-3	0,60	1,46	155,92

Media	0,49	1,47	179,31
--------------	-------------	-------------	---------------

Tabella 4 Valori rappresentativi delle miscele WET_1 e DRY_1.

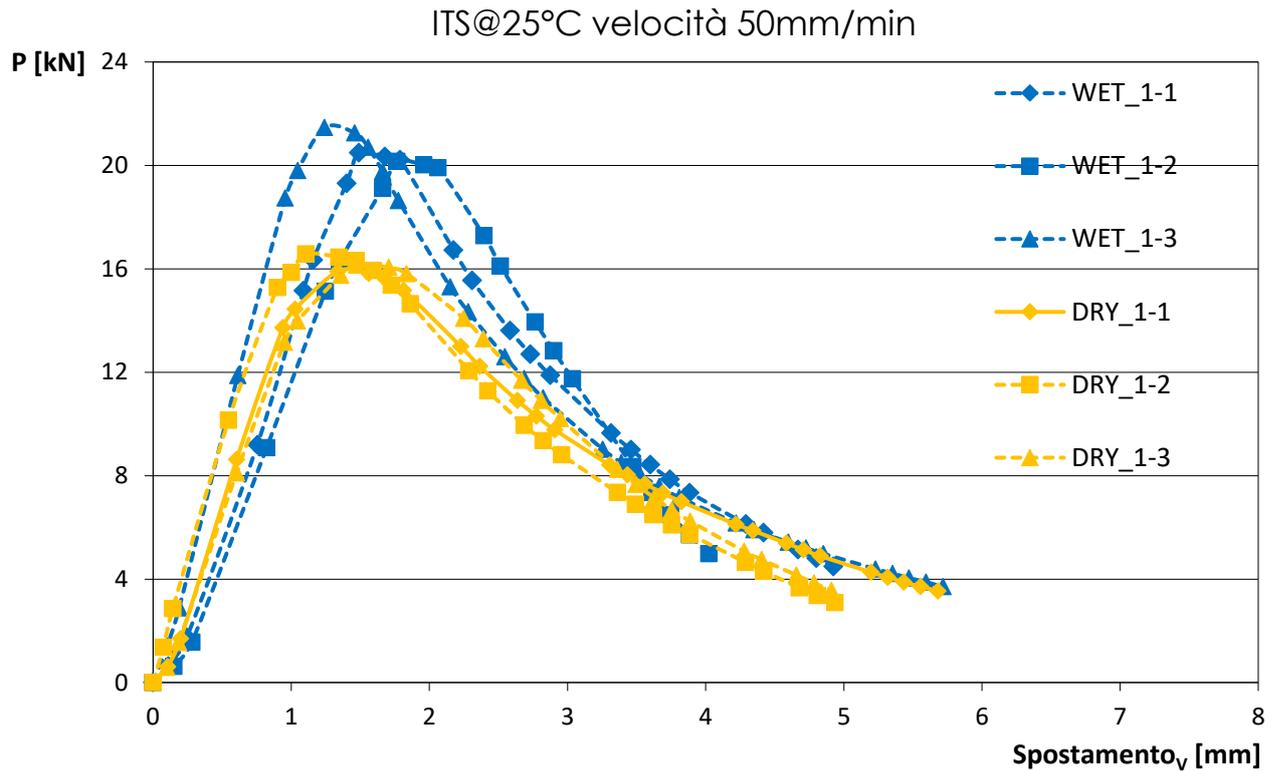


Grafico 15 Resistenza a trazione indiretta miscele WET_1 e DRY_1.

Come è possibile notare dal grafico 15, ad una temperatura di 25°C la miscela prodotta in modo “wet” sembrerebbe avere dei valori di picco di resistenza a trazione indiretta mediamente più alti. Mentre i valori di spostamento relativi al picco di resistenza di ogni miscela sono del tutto simili tra le due miscele.

In conclusione, come specificato da normativa andiamo a controllare visivamente com'è avvenuta la rottura dei campioni:



Figura 59 Rottura del campione al termine della prova.

Seguendo la normativa UNI EN 12697-23 definiamo la rottura di tipo:

- c) "combinazione", provini con una linea di rottura a trazione limitata e aree deformate più grandi vicino alle strisce di carico.

Nel prossimo confronto le miscele analizzate restano le medesime, però abbiamo deciso di produrre dei campioni con delle percentuali di vuoti leggermente maggiori. Abbiamo compattato tramite pressa a taglio girevole, questa volta impostando la modalità di compattazione ad altezza (70mm) con un carico di 600kPa. La temperatura selezionata per questa prova, sia di condizionamento sia di esecuzione del test, è di 10 °C. La velocità di avanzamento del carico resta invariata a 50 ± 2 mm/min.

In questo confronto abbiamo compattato in totalità 12 campioni selezionandone 6 per un invecchiamento a lungo termine, ovvero inseriti in forno a condizionare per 120h ad una temperatura di 85°C, i restanti 6 quindi saranno i condizionati a breve termine. Poiché le miscele non sono prodotte in laboratorio, ma arrivano da impianti, i campioni compattati con giratoria sono da considerare già condizionati a breve termine.

BREVE TERMINE

Di seguito le tabelle relative alla percentuale di vuoti, ai valori di RTI (Resistenza Trazione Indiretta), ai valori di CTI (Coefficiente di Trazione Indiretta) ed il grafico relativo alla prova:

WET_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
WET_1-3	2,66	3,24	524,94
WET_1-5	3,00	3,07	314,70
WET_1-6	3,00	3,26	392,10

DRY_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
DRY_1-1	1,49	3,50	657,71
DRY_1-2	2,03	3,70	812,01
DRY_1-4	1,73	3,38	624,90

Media	2,89	3,19	410,58
--------------	-------------	-------------	---------------

Media	1,75	3,53	698,20
--------------	-------------	-------------	---------------

Tabella 5 Valori rappresentativi delle miscele WET_1 e DRY_1.

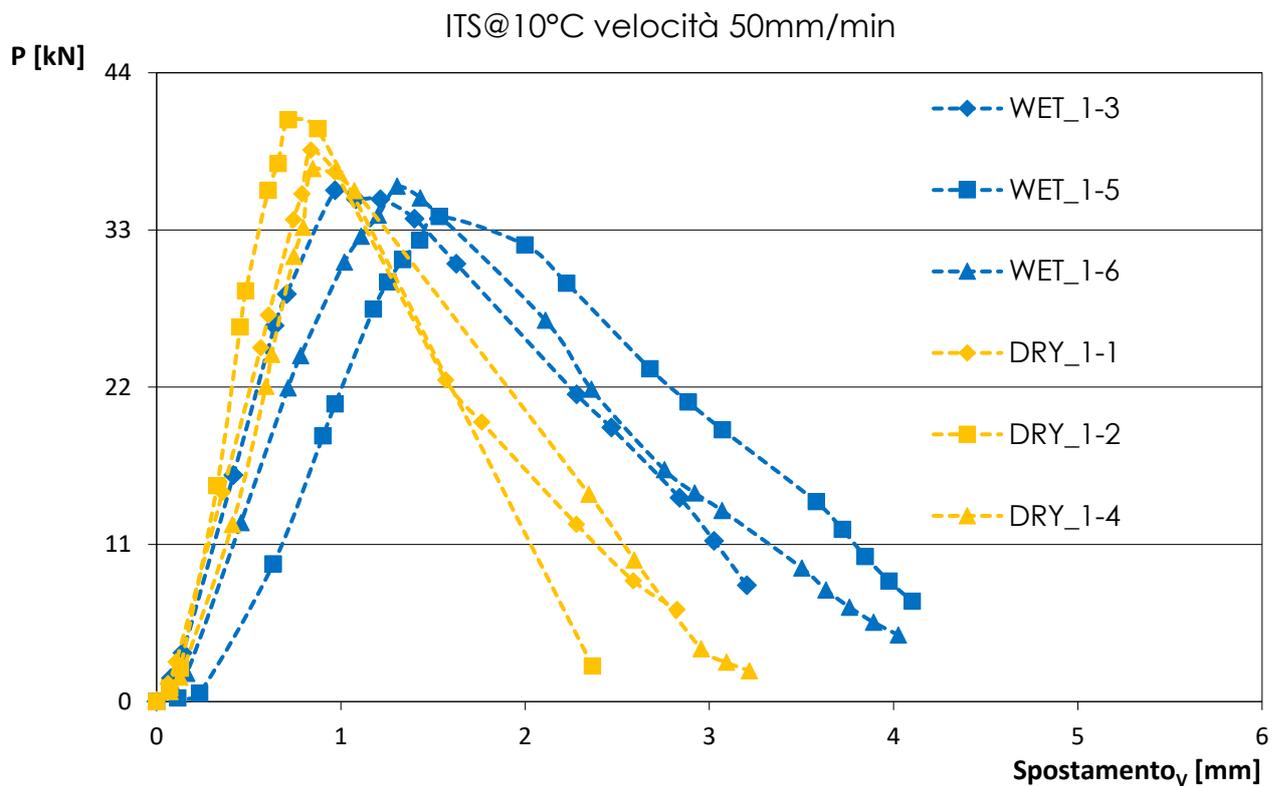


Grafico 16 Resistenza a trazione indiretta miscele WET_1 e DRY_1.

In questa prova ad una temperatura di 10°C, con campioni condizionati a breve termine, si può notare nel grafico 16 come la miscela prodotta con tecnologia dry risulta avere mediamente dei valori di resistenza maggiori, anche se possiamo distinguere che la rottura avviene per valori di spostamento leggermente minori rispetto alla miscela realizzata con metodo wet.

LUNGO TERMINE

Di seguito le tabelle con i valori significativi delle miscele e successivamente il grafico relativo alla prova:

WET_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
WET_1-1	2,45	3,25	386,77
WET_1-2	2,35	3,62	799,48
WET_1-4	2,57	3,29	475,22

Media	2,46	3,39	553,82
--------------	-------------	-------------	---------------

DRY_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
DRY_1-3	2,40	3,54	326,43
DRY_1-5	2,06	3,56	681,24
DRY_1-6	2,13	3,13	646,07

Media	2,20	3,41	551,25
--------------	-------------	-------------	---------------

Tabella 6 Valori rappresentativi delle miscele WET_1 e DRY_1.

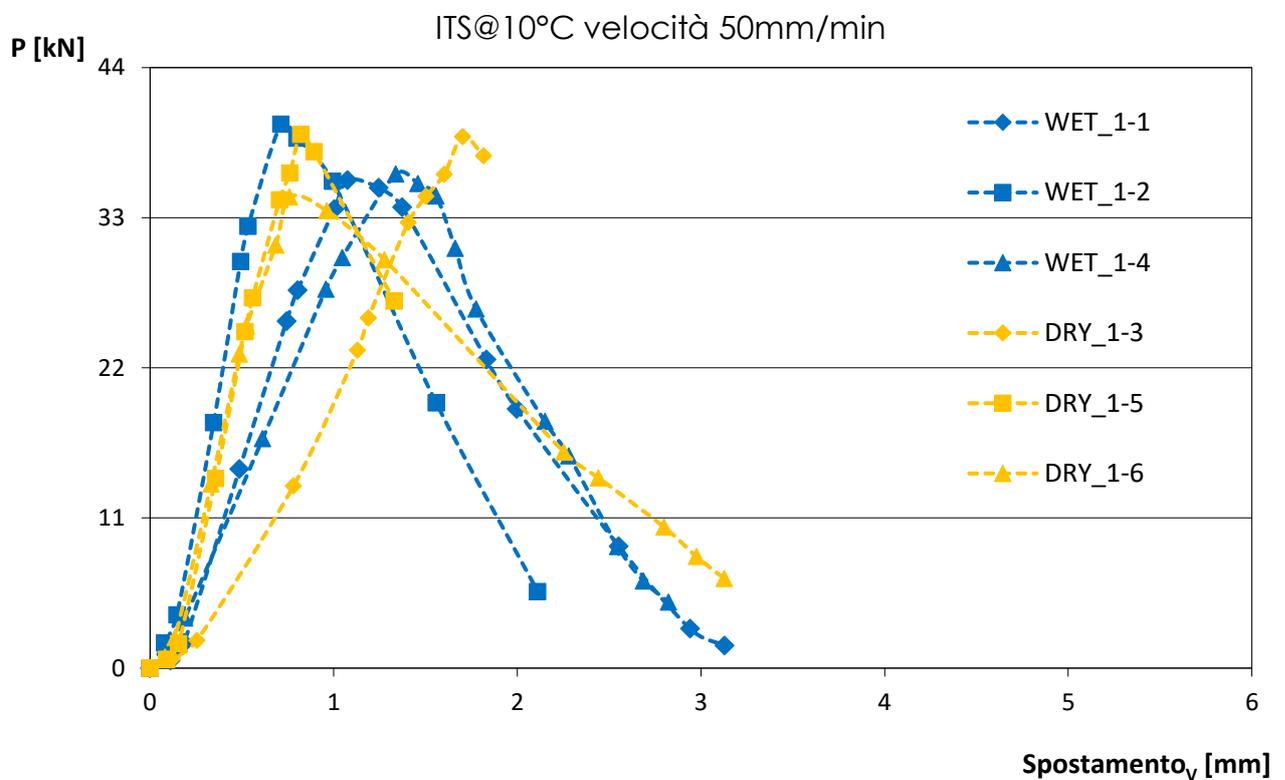


Grafico 17 Resistenza a trazione indiretta miscele WET_1 e DRY_1.

Per quanto riguarda questa prova realizzata ad una temperatura di 10°C, con campioni invecchiati a lungo termine, possiamo notare nel grafico 17 come i valori sono del tutto simili in entrambe le miscele, non è quindi possibile determinare delle differenze significative tra i comportamenti delle miscele.

In conclusione, come da normativa specificato andiamo a controllare visivamente com'è avvenuta la rottura dei campioni:



Figura 60 Rottura dei campioni al termine della prova.

Seguendo la normativa UNI EN 12697-23 definiamo la rottura di tipo:

- d) "combinazione", provini con una linea di rottura a trazione limitata e aree deformate più grandi vicino alle strisce di carico.

Nel prossimo confronto abbiamo deciso di utilizzare sempre le medesime miscele, WET_1 e DRY_1. Per quanto riguarda le modalità di compattazione, questa volta abbiamo deciso di impostare nella pressa giratoria la modalità non più ad altezza ma a numero di giri, impostando 50 giri con carico di 600kPa. Anche in questo confronto abbiamo prodotto 12 campioni con la giratoria, 6 per relativa miscela da confrontare, e poi diviso i campioni per il condizionamento analogo alla prova precedente. La temperatura selezionata per questa prova, sia di condizionamento sia di esecuzione del test, è di 10 °C. Per questa prova, invece, abbiamo deciso di diminuire la velocità di avanzamento del carico, in modo da avere un numero maggiore di punti nel grafico, impostandola quindi a 12,5mm/min.

BREVE TERMINE

Di seguito le tabelle relative alla percentuale di vuoti, ai valori di RTI (Resistenza Trazione Indiretta), ai valori di CTI (Coefficiente di Trazione Indiretta) ed il grafico relativo alla prova:

WET_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
WET_1-3	1,98	2,51	319,84
WET_1-4	2,55	2,19	241,11
WET_1-5	2,45	2,44	290,21

Media	2,33	2,38	283,72
--------------	-------------	-------------	---------------

DRY_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
DRY_1-3	2,62	2,31	283,6
DRY_1-4	3,71	2,13	297,0
DRY_1-5	2,47	2,15	155,7

Media	2,93	2,20	245,41
--------------	-------------	-------------	---------------

Tabella 7 Valori rappresentativi delle miscele WET_1 e DRY_1.

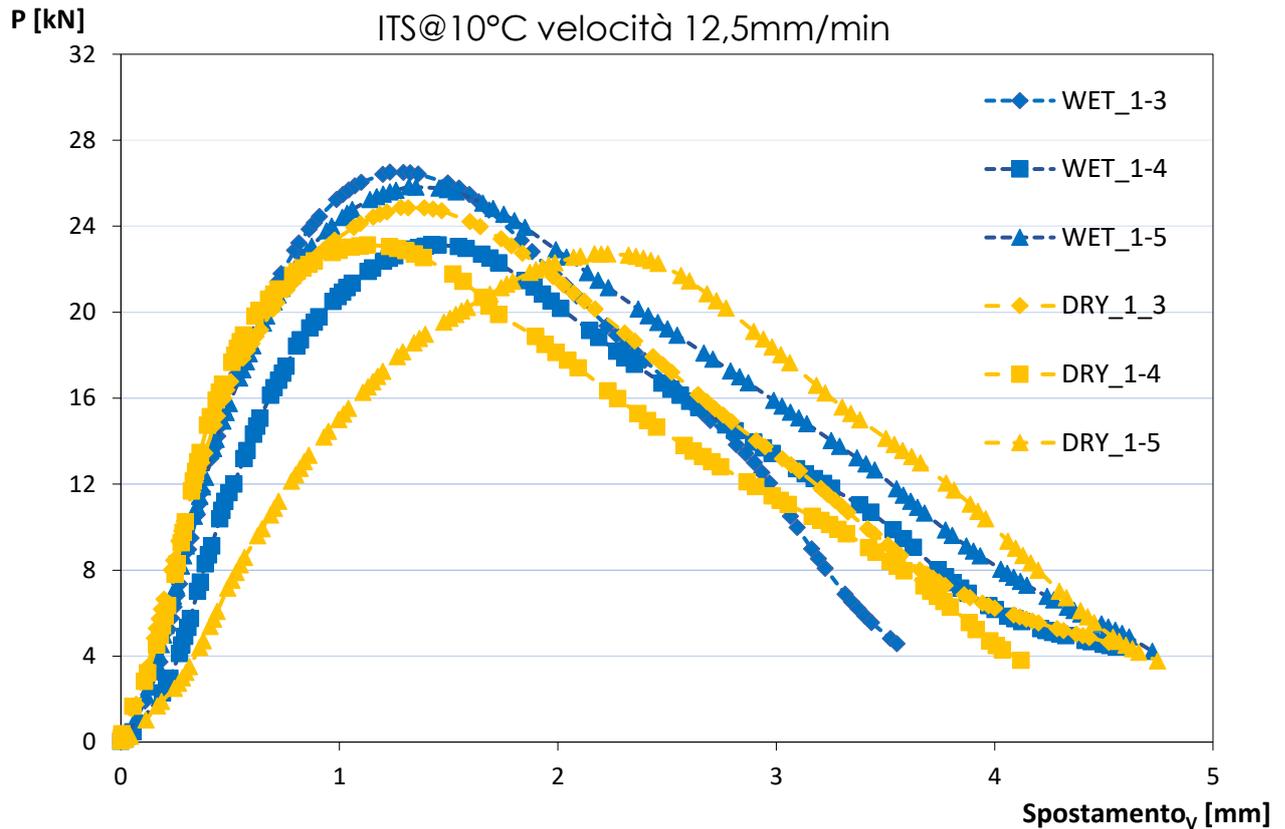


Grafico 18 Resistenza a trazione indiretta miscele WET_1 e DRY_1.

Per quanto riguarda i campioni condizionati a breve termine, sottoposti alla prova con temperatura di 10°C a velocità di carico ridotta, possiamo notare nel grafico 18 come ci sia un'assoluta somiglianza tra le curve delle due miscele analizzate, non vi è quindi una differenza concreta.

LUNGO TERMINE

Di seguito le tabelle relative alla percentuale di vuoti, ai valori di RTI (Resistenza Trazione Indiretta), ai valori di CTI (Coefficiente di Trazione Indiretta) ed il grafico relativo alla prova:

WET_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
WET_1-1	2,91	2,62	464,7
WET_1-2	3,18	2,30	336,9
WET_1-6	3,57	2,68	386,0

Media	3,22	2,53	395,87
--------------	-------------	-------------	---------------

DRY_1			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
DRY_1-1	3,16	2,62	457,2
DRY_1-2	3,58	2,28	270,3
DRY_1-6	3,69	2,07	200,7

Media	3,48	2,32	309,39
--------------	-------------	-------------	---------------

Tabella 8 Valori rappresentativi delle miscele WET_1 e DRY_1.

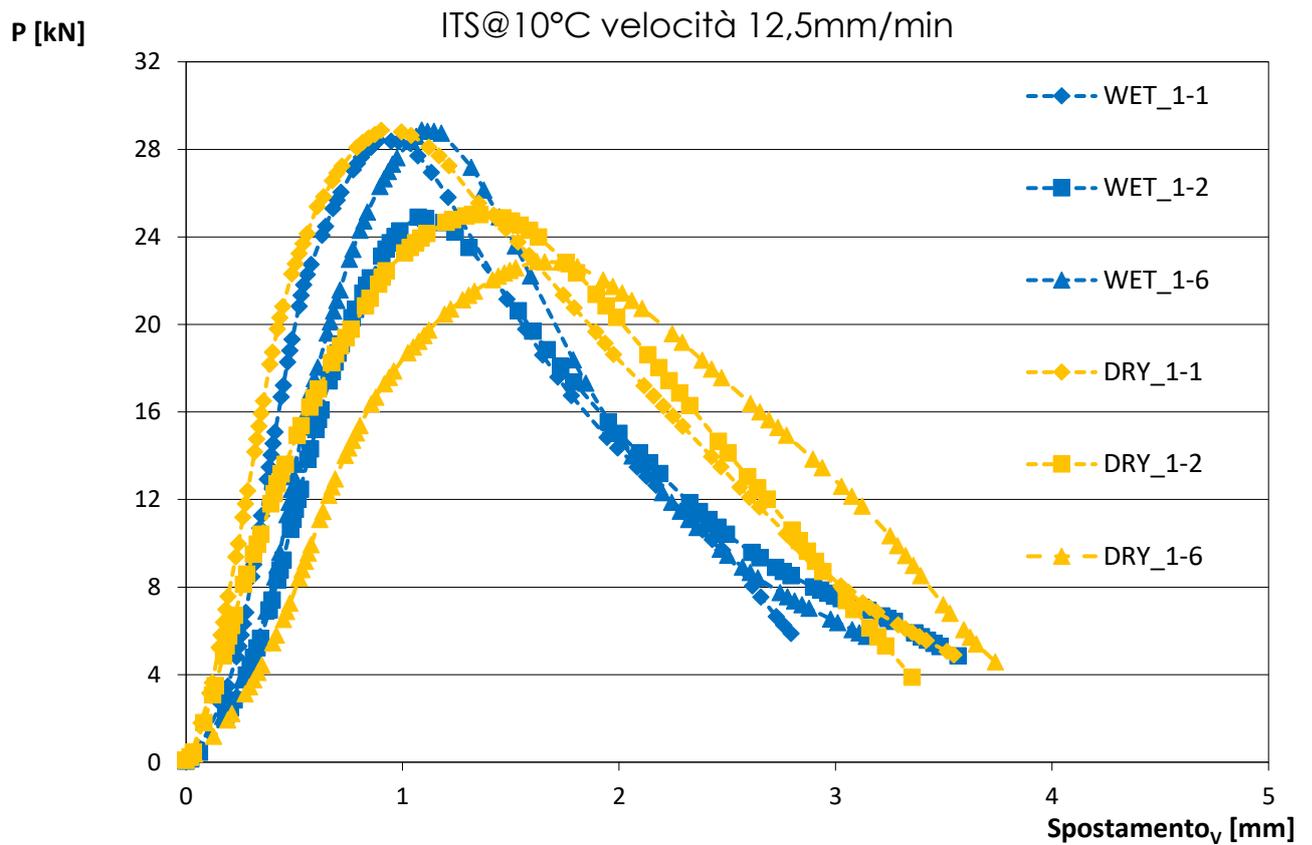


Grafico 19 Resistenza a trazione indiretta miscele WET_1 e DRY_1.

Nel grafico della seguente prova a velocità di carico ridotta con campioni invecchiati a lungo termine si denota una grande similitudine tra le curve con una resistenza leggermente maggiore per quanto riguarda la miscela wet.

In conclusione, come da normativa specificato andiamo a controllare visivamente com'è avvenuta la rottura dei campioni:



Figura 61 Rottura dei campioni al termine della prova.

Seguendo la normativa UNI EN 12697-23 definiamo la rottura di tipo:

- e) "combinazione", provini con una linea di rottura a trazione limitata e aree deformate più grandi vicino alle strisce di carico.

Nell'ultimo confronto tramite test di resistenza a trazione indiretta (ITS) abbiamo deciso di selezionare la miscela WET_2 e la miscela DRY_2. Per questa prova abbiamo compattato 6 campioni con pressa a taglio giratorio, 3 per miscela, impostando la compattazione ad altezza (50mm) con carico di 600kPa. Il test è stato svolto ad una temperatura di 25°C, dopo aver condizionato i campioni alla medesima temperatura per almeno 2h prima della prova.

La velocità di avanzamento del carico è stata 50 ± 2 mm/min.

Di seguito le tabelle relative alla percentuale di vuoti, ai valori di RTI (Resistenza Trazione Indiretta), ai valori di CTI (Coefficiente di Trazione Indiretta) ed il grafico relativo alla prova:

WET_2			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
WET_2-1	3,82	1,83	284,19
WET_2-2	4,84	1,29	132,57
WET_2-3	5,09	1,29	97,86

Media	4,58	1,47	171,54
--------------	-------------	-------------	---------------

DRY_2			
ID	v [%]	RTI [MPa]	CTI [MPa]
DRY_2-1	4,22	2,12	392,57
DRY_2-2	4,22	1,93	337,86
DRY_2-3	4,90	2,10	381,55

Media	4,45	2,05	370,66
--------------	-------------	-------------	---------------

Tabella 9 Valori rappresentativi delle miscele WET_2 e DRY_2.

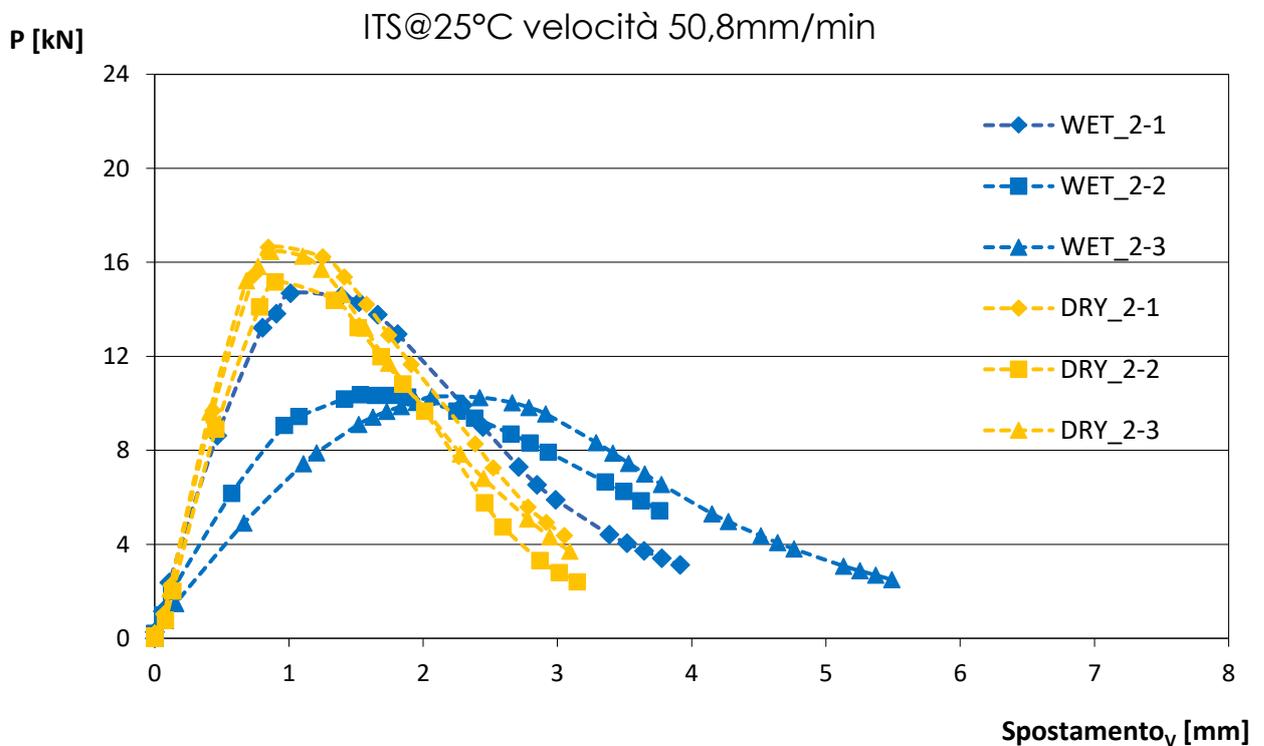


Grafico 20 Resistenza a trazione indiretta miscele WET_2 e DRY_2.

In quest'ultimo confronto notiamo che la miscela prodotta in modalità dry risulta avere mediamente una resistenza a trazione indiretta superiore alla miscela prodotta con tecnologia wet. Possiamo però notare che la rottura della miscela wet tende ad avere, dei bassi valori di resistenza, ma tende anche a raggiungere valori di picco con uno spostamento maggiore.

In conclusione, come da normativa specificato andiamo a controllare visivamente com'è avvenuta la rottura dei campioni:



Figura 62 Rottura dei campioni al termine della prova.

Seguendo la normativa UNI EN 12697-23 definiamo la rottura di tipo:

- f) "combinazione", provini con una linea di rottura a trazione limitata e aree deformate più grandi vicino alle strisce di carico.

5.2.2. Analisi di resistenza a fatica

Una delle prove più moderne e rappresentative sulla durata in esercizio delle pavimentazioni è sicuramente la prova di resistenza a fatica. Le prove di fatica necessitano di un elevato numero di ore per l'esecuzione e, per questo motivo, si è reso necessario individuare due tra le tre miscele polimeriche proposte da sottoporre al confronto. Abbiamo deciso di utilizzare la miscela denominata WET_1 e la miscela DRY_1, poiché hanno raggiunto valori più alti in rigidità.

Il procedimento utilizzato per la determinazione della resistenza a fatica segue la normativa UNI EN 12697-24 (Annesso E). I test di fatica condotti in laboratorio possono essere eseguiti secondo due modalità di controllo: tensione imposta o deformazione imposta. Nella modalità a controllo di tensione viene fissato il carico da applicare al provino che rimarrà costante durante l'esecuzione della prova, come nel nostro caso [19].

Tutti i campioni testati hanno seguito un preventivo condizionamento a 10°C per almeno 4h, con conseguente prova eseguita alla medesima temperatura. Durante l'esecuzione del test, il computer collegato con la macchina UTM-10 registra una molteplicità di dati, come la deformazione del campione, il numero di cicli di carico e scarico, il modulo di rigidità e la forza applicata. In output, quindi, si registrano gli spostamenti osservati mediante i trasduttori del macchinario. In controllo di tensione, all'aumentare del numero di cicli di carico, gli spostamenti rilevati si fanno via via più importanti in quanto nel tempo il provino diminuisce la propria rigidità.

La prova eseguita a controllo di tensione è la più utilizzata per la valutazione della vita a fatica di pavimentazioni stradali ad alto spessore in quanto riproduce in modo più fedele le modalità di applicazione del carico veicolare. I dati raccolti vengono analizzati per determinare la resistenza a fatica del conglomerato bituminoso e la relazione tra il numero di cicli e la deformazione del campione [19].

Di seguito alcuni dati significativi dei campioni testati:

CAMPIONE	Tensione [kPa]	Modulo di rigidezza [Mpa]	ϵ Iniziale [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Cicli	%v
WET-4	600	14550	104,6	148288	4,4
WET-5	600	12753	122	111914	5,4
WET-3	750	12519	152,8	24830	5,9
WET-9	750	14035	153,6	36029	6,0
WET-8	750	11475	185,4	12254	6,5
WET-2	1000	11883	221	4488	6,6
WET-7	1000	13622	227,4	6673	6,5
WET-1	1500	14837	274,8	1297	6,5
DRY-4	600	16983	90	105788	5,0
DRY-6	600	13896	118,2	110209	6,4
DRY-5	750	13902	149,2	35891	6,3
DRY-9	750	16435	121,2	52681	6,3
DRY-10	750	14644	133,2	52681	5,4
DRY-3	1000	14987	169	5738	6,5
DRY-12	1000	14230	180,2	7261	6,6
DRY-2	1500	13357	331	945	6,3

Tabella 10 Valori delle prove a fatica delle miscele analizzate.

I risultati dell'analisi dei dati vengono interpretati per valutare la durabilità del conglomerato bituminoso e per identificare eventuali problemi nella sua composizione.

Possiamo subito notare dalla tabella 10 come le percentuali dei vuoti tra le due miscele sia molto simile, con una percentuale che si aggira tra il 5%-6%, tranne per due miscele dove questa percentuale è un pochino inferiore al 5%. Possiamo constatare inoltre che le deformazioni iniziali dei due conglomerati analizzati variano, esse sono mediamente maggiori per il conglomerato prodotto con tecnologia wet, a differenza della sola prova realizzata con tensione di 1500 kPa.

Per quanto riguarda il modulo di rigidezza, un fattore molto importante nelle prove di fatica, notiamo che esso è mediamente maggiore nei campioni di miscela prodotta con addizione dry.

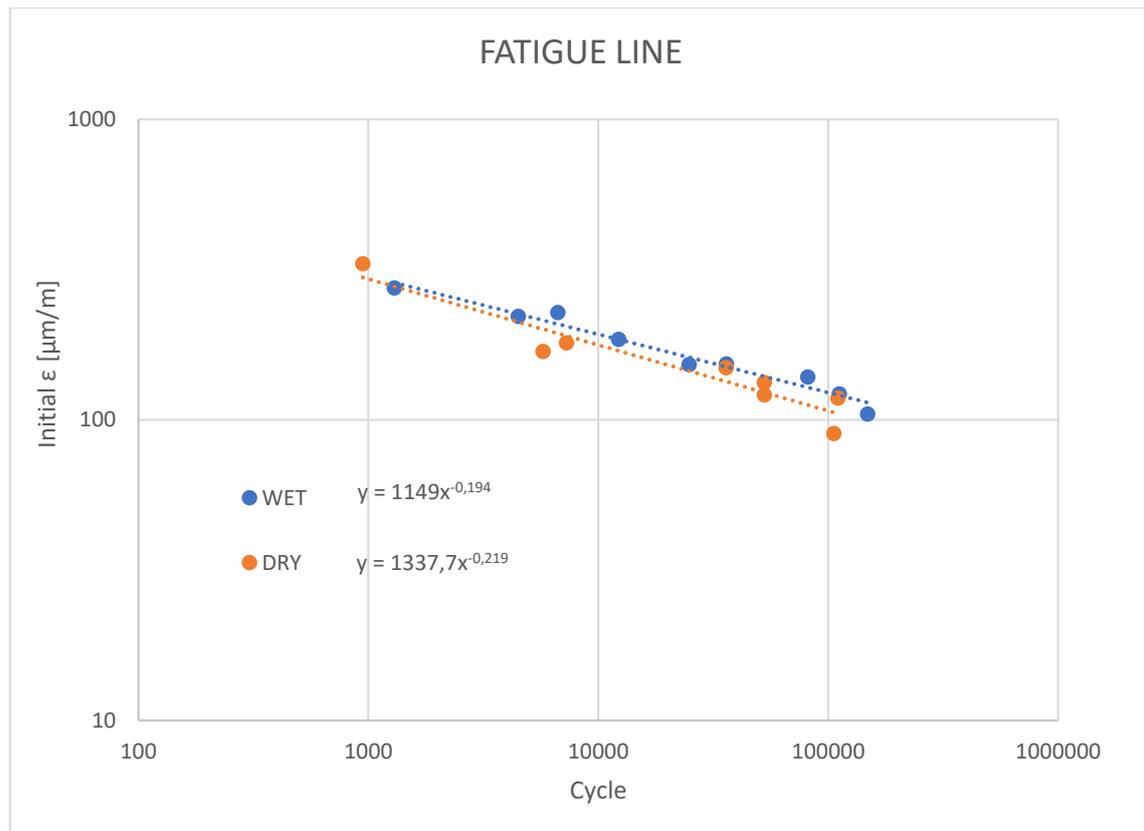


Grafico 21 Linee di fatica delle miscele WET_1 e DRY_1.

Dal grafico 21 più significativo di questo test, ovvero la curva di fatica si può notare come la miscela WET_1 abbia una resistenza alla fatica maggiore della miscela DRY_1, anche se poco marcata. Nel grafico sono presenti anche le funzioni che caratterizzano le curve, significative per ogni miscela.

Poiché sappiamo, da molteplici studi precedenti, che vi è un sussistente e forte legame tra rigidità e vita a fatica di una miscela, possiamo notare come la miscela prodotta con metodo di addizione polimerico wet nonostante abbia una rigidità iniziale minore raggiunga cicli di fatica più elevati.

Queste osservazioni circa la proporzionalità rigidità-fatica non sono nuove nell'analisi della vita di materiali adottati nella realizzazione di pavimentazioni stradali perché, già nel 1973, P. S. Pell scrisse alcune considerazioni circa le variabili che influenzano la vita a fatica del conglomerato bituminoso. Tra tutte, la rigidità sembrava giocare un ruolo fondamentale. Nelle prove condotte in quegli anni si registrò che, in controllo di tensione, le curve di fatica ottenute sottolineavano come la maggior rigidità del materiale avesse un beneficio in termini di

durabilità sotto cicli di carico ripetuti [23]. Allora le indagini vennero fatte sul conglomerato bituminoso, oggi altri studi hanno confermato questa tendenza anche per materiali a base di legante polimerico.

In conclusione, possiamo affermare quindi che la miscela DRY_1 ha un comportamento a fatica peggiore, poiché anche avendo valori di rigidità iniziale maggiori, oltre a valori di deformazioni iniziali minori, della miscela WET_1, essa raggiunge cicli di carico simili, in alcuni casi inferiori. Inoltre, possiamo notare graficamente come la pendenza della curva della miscela WET_1 sia minore della miscela DRY_1, indice di una migliore resistenza a fatica delle miscele.

In Allegato 8.1. troviamo tutti i grafici relativi alle prove di resistenza a fatica divisi per livelli di tensione applicata, in cui possiamo notare come varia il modulo all'aumentare del numero di cicli, e i grafici relativi alla vita della frattura.

5.2.3. Curve maestre

Per valutare il comportamento termo-visco-elastico delle miscele bituminose, si utilizza il modulo dinamico. Questo viene misurato applicando un carico monoassiale a diversi campioni a diverse frequenze (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz) e temperature di condizionamento (4°C, 20°C e 40°C), al fine di simulare le condizioni ambientali e l'effetto veicolare della pavimentazione durante l'utilizzo [20,21].

I campioni esaminati sono stati realizzati utilizzando la pressa a taglio giratorio impostata ad altezza. In primis, abbiamo realizzato campioni di diametro 150 mm e altezza, circa 180 mm. Successivamente, utilizzando una carotatrice e una taglierina, questi sono stati ridotti alle dimensioni di 94 mm di diametro e 130 mm di altezza. Lo scopo di questo processo è stato quello di ottenere solo il cuore del campione compattato, senza l'effetto delle pareti dovute alla modalità di compattazione, al fine di uniformare il contenuto di vuoti al loro interno.

Per una questione organizzativa per il primo confronto tra conglomerati WET_1 e DRY_1 abbiamo ripetuto il test di modulo dinamico 3 volte, mentre per il secondo confronto tra WET_2 e DRY_2 è stata svolta solo una ripetizione del test.

Di seguito la tabella 11 riassuntiva con i valori dei vuoti ottenuti dalla caratterizzazione delle miscele, post determinazione della massa volumica nel cuore carotato nei campioni:

CAMPIONE	Vuoti [%]
WET_1	1,64
WET_2	5,25
DRY_1	2,42
DRY_2	5,58

Tabella 11 Vuoti delle miscele analizzate.

Per eseguire questa prova, si utilizza una UTM-30 che registra la deformazione del campione attraverso tre trasduttori, permettendo di determinare il valore del modulo complesso E^* e

l'angolo di fase. In allegato sono riportati i valori medi delle diverse frequenze ottenuti dai diversi campioni.

Attraverso i valori di modulo E^* determinati alle diverse temperature e frequenze, possiamo realizzare le curve maestre. Si applica il principio di equivalenza tempo-temperatura dei conglomerati bituminosi, in cui il valore del modulo dinamico ottenuto a una determinata temperatura di riferimento (in questo caso 20°C) viene amplificato per un campo di frequenze ridotto. Nel primo passaggio abbiamo ovviamente tre curve diverse, ognuna con valori di modulo complesso diversi a tre discorde temperature per le medesime frequenze. Utilizzando gli shift-factor, è possibile passare dal dominio delle frequenze reali al dominio delle frequenze ridotte relative alla temperatura di riferimento, ottenendo così un'unica curva di modulo composta dai valori delle tre curve sperimentali: i valori di modulo ad alte temperature vengono traslate verso sinistra rispetto alla temperatura di riferimento, mentre i valori di modulo a basse temperature vengono traslati verso destra [20,21].

I dati grezzi sperimentali vengono modellati in accordo con il MEPDG, con alcune variazioni, ottenendo una sigmoide. L'ottimizzazione viene eseguita utilizzando il risolutore di Excel, variando i parametri γ , β , δ e il valore dell'asintoto vetroso $|E^*|_{\text{max}}$.

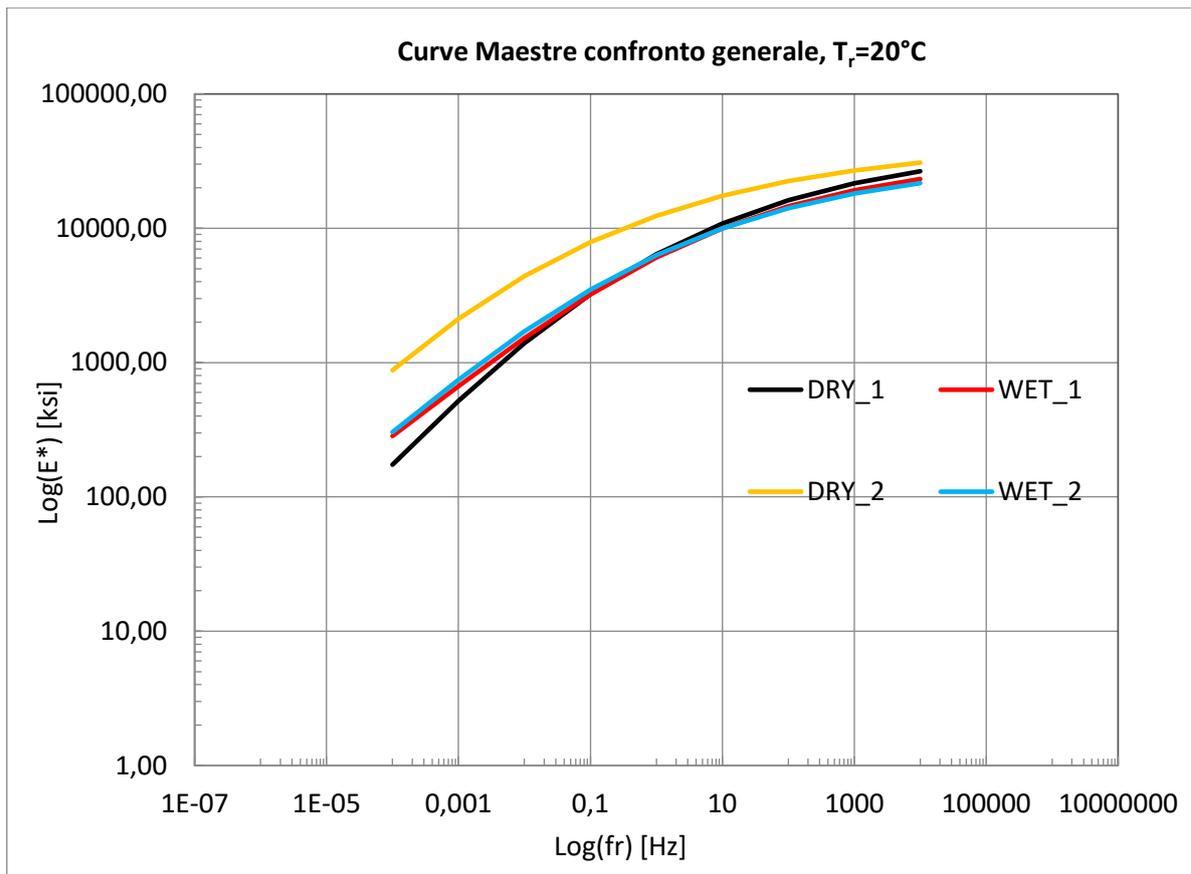


Grafico 22 Curve maestre delle miscele analizzate.

Il grafico riporta le curve maestre delle miscele bituminose modellate nel campo di frequenze ridotte comprese tra 10^{-4}Hz e 10^4 Hz lungo le ascisse, e tra 100 Mpa e 40000 Mpa per quanto riguarda i valori di modulo complesso E^* [20,21].

Ciascuna curva riproduce il comportamento termo-visco-elastico di una singola miscela bituminosa. A frequenze elevate e basse temperature, i valori di modulo dinamico aumentano e producono un comportamento che si accosta all'asintoto vetroso, dove il comportamento del conglomerato bituminoso è dominato dal bitume, rendendo la miscela estremamente rigida. Al contrario, a frequenze basse ed elevate temperature, la miscela bituminosa mostra un comportamento viscoso, poiché il bitume diventa viscoso e fluisce in quella zona e il comportamento è influenzato principalmente dallo scheletro litico.

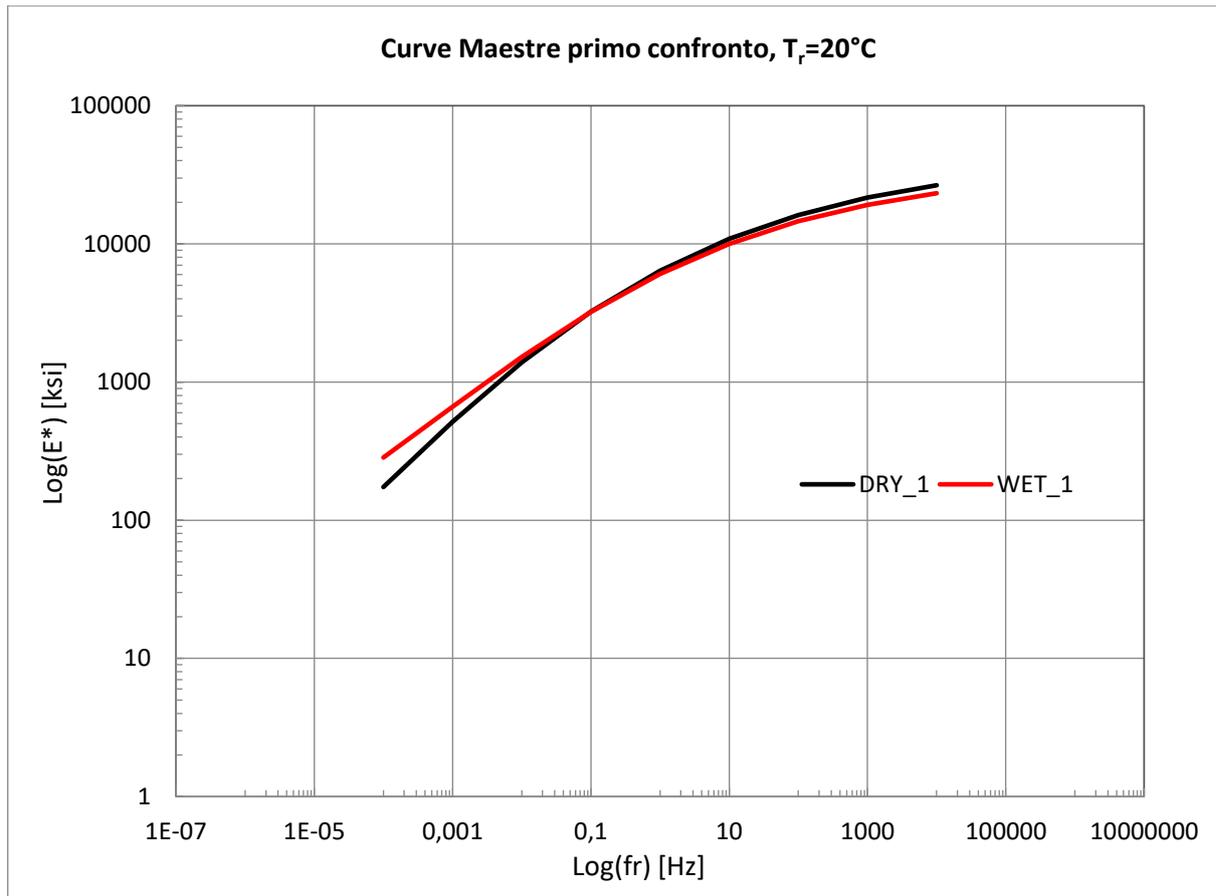


Grafico 23 Curve maestre confronto 1.

In questo primo confronto nel grafico 23 si può notare che è presente una quasi totale coincidenza delle curve, con valori un pochino più bassi di modulo E^* a basse frequenze per il conglomerato prodotto con metodo dry. La granulometria del conglomerato wet non è quella ottimale poiché, come abbiamo visto nella composizione granulometrica, la curva di questo materiale si allontana maggiormente dai fusi limite e questo potrebbe peggiorarne le prestazioni. I vuoti della miscela dry sono maggiori mediamente nei campioni di un punto percentuale, e le percentuali di bitume sono del tutto simili nelle due miscele.

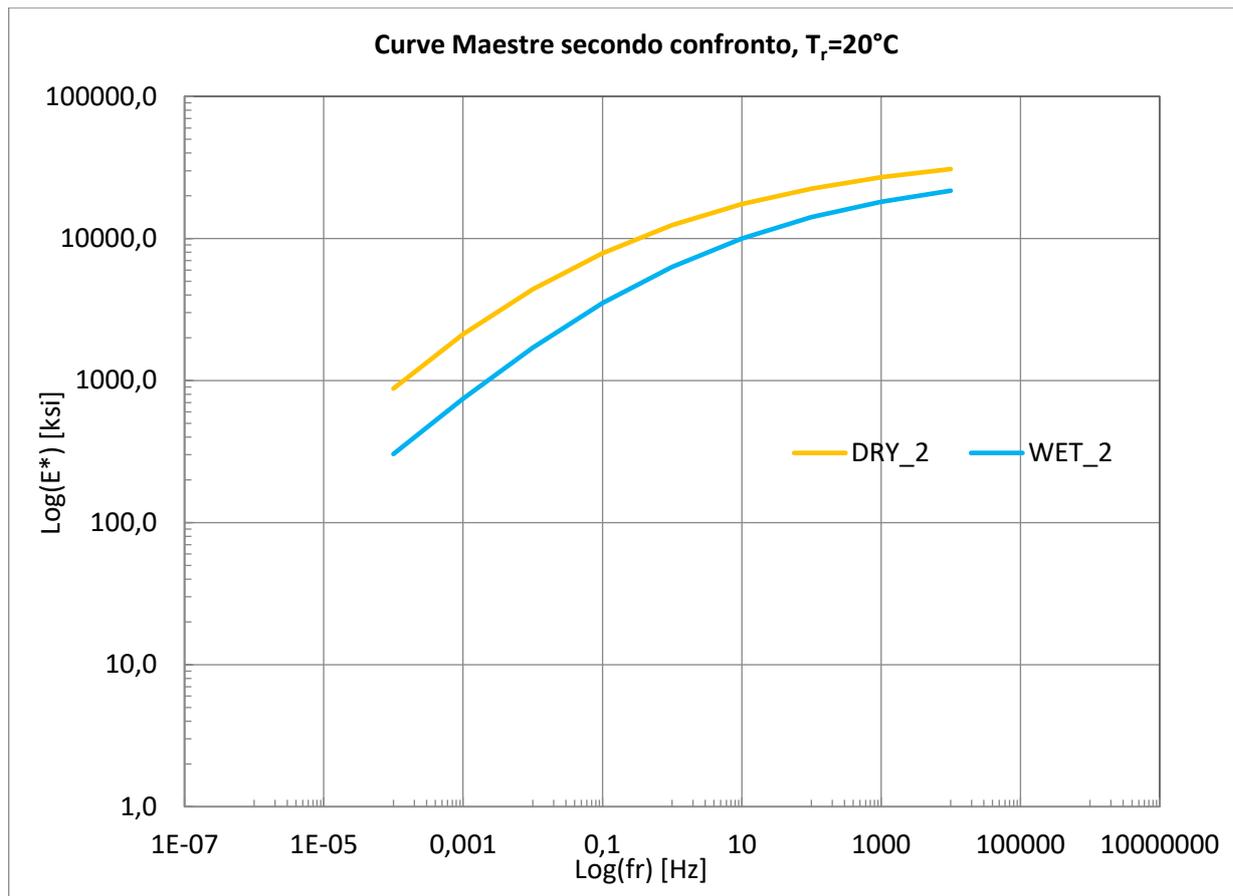


Grafico 24 Curve maestre confronto 2.

Nel secondo confronto riportato nel grafico 24 invece, possiamo affermare che c'è una ben più netta differenza tra i due mix. La curva del conglomerato addizionato con polimeri in modalità dry ha un modulo complesso E^* maggiore a tutte le frequenze. A parità dello scheletro litico delle due miscele, visto precedentemente, abbiamo differenze di VFB, la miscela wet risulta avere una percentuale del tutto simile alle miscele del primo confronto, mentre la miscela DRY_2 ha il 10% in meno di questo valore. Riprendendo il grafico del confronto generale possiamo notare che solo la miscela DRY_2 ha valori maggiori in modulo per tutte le frequenze, risultato che associamo ad un valore inferiore di VFB, per concludere le altre tre miscele raggiungono comunque dei buoni risultati ma sono tra loro molto simili in comportamento, non evidenziando grosse differenze.

In Allegato 8.2. sono riportate tutte le ulteriori tabelle significative per il confronto del modulo dinamico e le sue relative curve maestre.

5.2.4. Flow number

I campioni utilizzati nel secondo confronto per il modulo dinamico, WET_2 e DRY_2, vengono impiegati anche per valutare la loro resistenza alle deformazioni permanenti mediante una prova distruttiva di compressione ciclica monoassiale nota come “flow number test”. Questa prova assume grande rilevanza per lo strato di usura, poiché rappresenta lo strato più superficiale della pavimentazione ed è direttamente a contatto con gli pneumatici dei veicoli, subendo quindi i carichi veicolari [22].

Il “flow number test” prevede l’applicazione di un carico ciclico su un campione in modo da valutare la sua capacità di resistere alle deformazioni plastiche. Questa prova è particolarmente importante per valutare la capacità della pavimentazione di mantenere la forma e le caratteristiche strutturali a lungo termine, anche sotto carichi pesanti e continui. In questo modo, la prova consente di valutare la resistenza alla deformazione permanente del campione e, di conseguenza, di determinare la durabilità della pavimentazione.

I campioni assoggettati all’analisi sono stati condizionati alla temperatura di 55°C, come richiesto da Capitolato, e i risultati ottenuti sono pronunciati nella successiva tabella 12:

CAMPIONE	FLOW POINT	@ FLOW POINT
[94mmX130mm]	[cycles]	[microstrain]
WET_2	2042	27523
DRY_2	6159	20464

Tabella 12 Risultati delle miscele analizzate al termine della prova.

I dati ottenuti nelle due miscele, appartenenti allo strato di usura, mostrano un’ampia variabilità. Fin da subito 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 DRY_2 è quella per cui il VFB è tale da consentire alla miscela di essere deformata senza che il bitume venga espulso e la percentuale di vuoti è tale da raggiungere alti valori di flow number per un valore di deformazione che è nella media. I due campioni mostrano nel grafico 27 un comportamento tra loro non comparabile, nonostante abbiano valori di MV, %v, VMA simili. Per quanto riguarda i due campioni, si nota una differenza nel valore di cicli per flow point; infatti, nella miscela wet viene raggiunto con circa un terzo dei cicli rispetto alla miscela dry, con differenze di deformazioni più alte nella miscela WET_2. Per concludere,

si riportano gli andamenti della deformazione permanente in funzione del numero di cicli: questi mostrano uno scarso paragone tra le miscele, dovuto principalmente a fattori legati al contenuto di VFB, come precedentemente descritto.

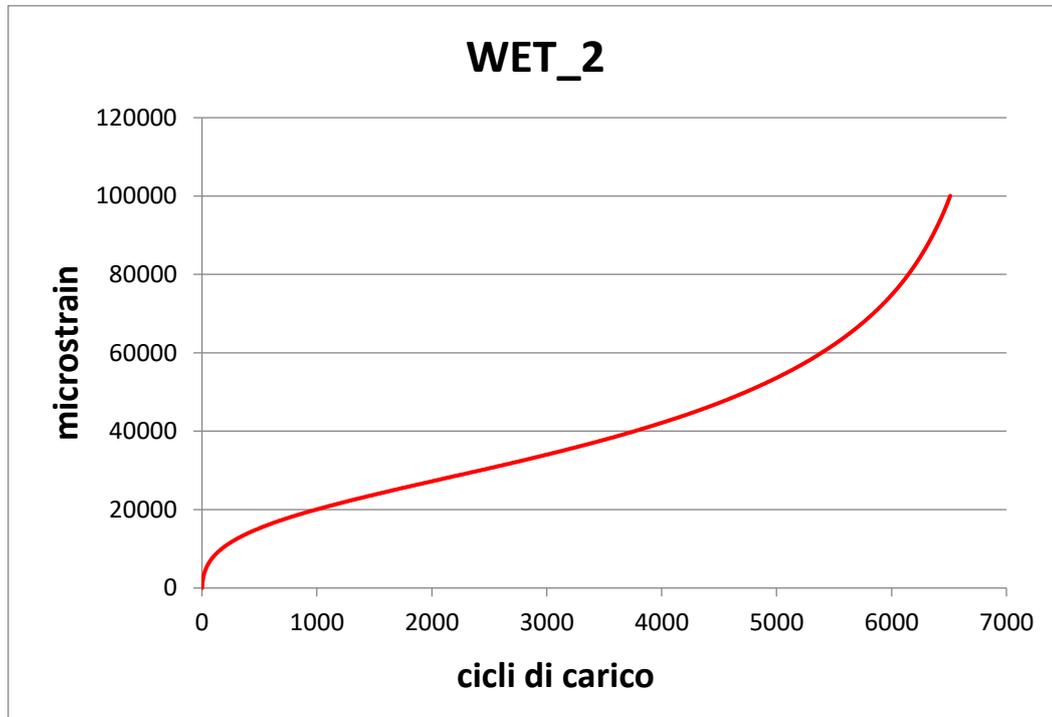


Grafico 25 Curva di flow number miscela WET_2.

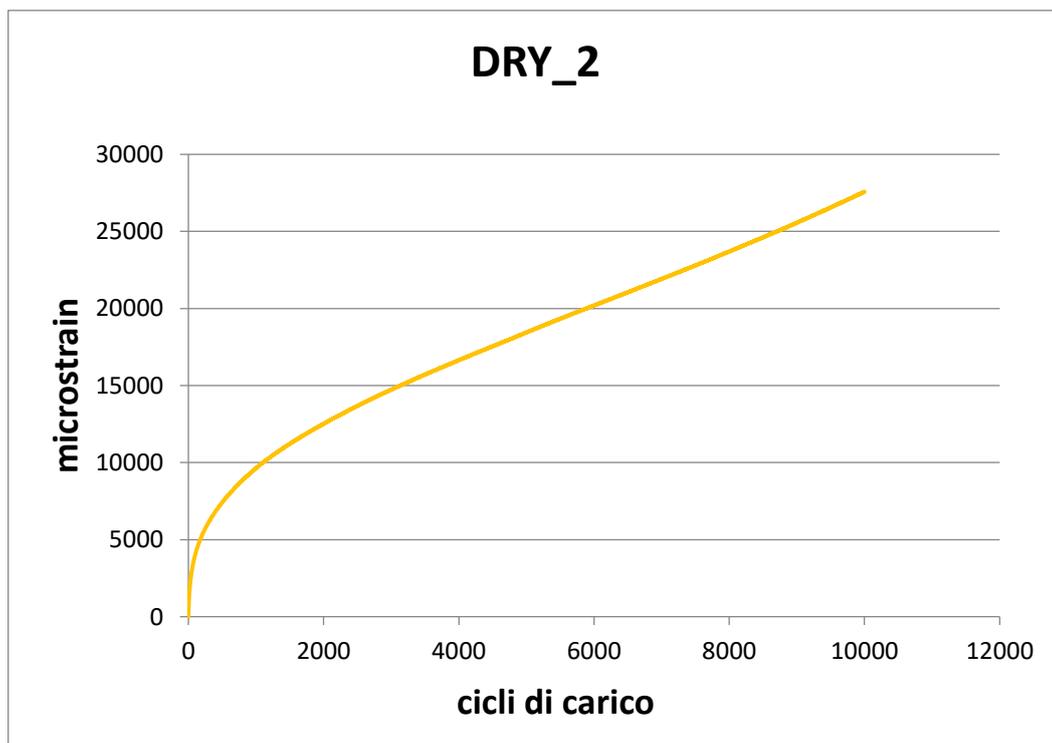


Grafico 26 Curva di flow number miscela DRY_2

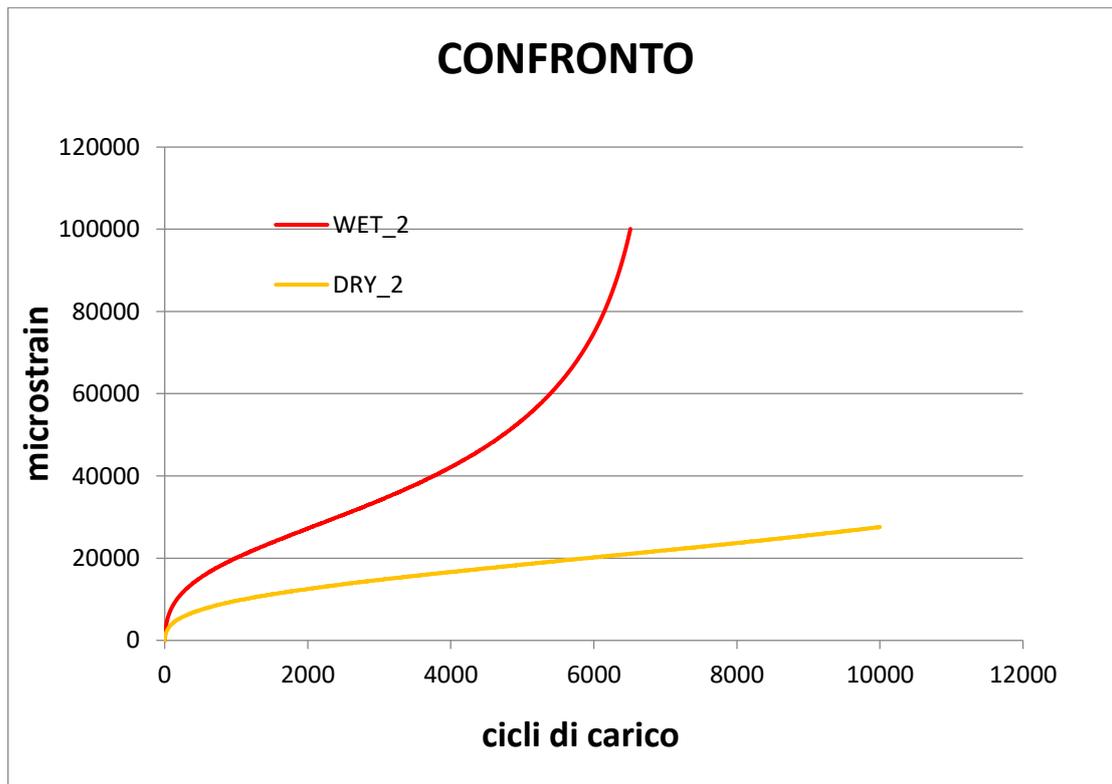


Grafico 27 Curve di flow number a confronto.

Infine, possiamo notare che il valore di riferimento minimo di FN suggerito da AASHTO T 378-17 per un livello di traffico maggiore di 30 milioni di ESALs e di 740. Questo valore viene comunque rispettato da entrambe le miscele.

Traffic Level Million ESALs	Minimum Flow Number Cycles
< 3	---
3 to < 10	53
10 to < 30	190
≥ 30	740

Tabella 13 Valori minimi di flow number per livelli di traffico ESALs.

6. Conclusioni

La presente sperimentazione condotta presso il Laboratorio Materiali Stradali del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, è stata svolta per mettere a confronto le due tecnologie di addizione dei polimeri all'interno di conglomerati bituminosi denominate "wet" e "dry".

Dai risultati ottenuti in termini di caratterizzazione compositiva e volumetrica le miscele investigate, denominate "wet" e "dry", non differiscono tra loro a livello di composizione, anche se, nel confronto numero due un valore più alto di VFB ha influito all'interno delle curve maestre.

Per quanto riguarda il confronto ottenuto dalla caratterizzazione meccanica, tema centrale di questo elaborato di tesi, risulta evidente quanto segue: la prova ITS ha mostrato che la tecnologia di addizione "wet" sembra, seppur di poco, garantire migliori prestazioni in termini di resistenza a trazione indiretta e di deformazione a rottura, in particolare alle alte temperature.

Dai risultati ottenuti, tramite analisi dei dati, sulla prova di resistenza alla fatica è emerso che i campioni realizzati con tecnologia di addizione "dry" hanno una linea di fatica con pendenza maggiore, e quindi si può dedurre che il conglomerato così prodotto arrivi a rottura con un numero minore di cicli. In questo caso è evidente come la miscela "wet" garantisca migliori prestazioni e una maggiore durata di servizio per la pavimentazione.

Tuttavia, è importante tenere presente che l'utilizzo della tecnologia "wet" richiede una maggiore attenzione alla gestione dei processi, l'utilizzo di solventi nella produzione e maggiori criticità legate allo stoccaggio e al trasporto dei bitumi modificati.

Inoltre, le tecniche di addizione "dry" risultano essere più semplici, terminando il processo di produzione con costi potenzialmente inferiori rispetto alla tecnologia "wet".

In generale, è importante notare che la scelta tra le due tecnologie dipenderà dalle esigenze specifiche del progetto, tra cui il tipo di aggregati e la destinazione d'uso della miscela finale.

Per entrambe le modalità di addizione si producono miscele che permettono di rispettare le normative del Capitolato Speciale d'Appalto. Tuttavia, l'utilizzo della tecnologia "wet" può essere preferibile nei casi in cui si richiede una maggiore durabilità del pavimento stradale, mentre la tecnologia "dry" può essere preferibile in progetti in cui la velocità di produzione e la gestione dei costi sono prioritari.

7. Bibliografia

- [1] Journal of Petroleum Science and Engineering. (2009).
“Bitumen production from crude oil” [Muhammad Imran Khan Et al.]
- [2] Journal of Transportation Engineering, Volume 142. (2016)
“Trend Analysis of Traffic Volumes on Highways: A Case Study in the United States”
[R. Zhang Et al.]
- [3] Construction and Building Materials, Volume 312. (2021).
“Asphalt concrete mixtures modified with polymeric waste by the wet and dry process:
A literature review” [Gabriel Macêdo Duarte; Adalberto Leandro Faxina]
- [4] MDPI, Materials Article. (2022).
“Effect of Different Types of “DryWay” Additions in Porous Asphalt Mixtures”
[Pedro Lastra-González Et al.]
- [5] Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE. (2017).
“Asphalt Surface Mixtures with Improved Performance Using Waste Polymers via Dry and
Wet
Processes” [Mauro Ranieri Et al.]
- [6] Rassegna del bitume, Estratto dal numero 14, SITEB srl. (1989).
“I leganti ed i conglomerati bituminosi modificati” [Vittorio Castagnetta]
- [7] MDPI, Materials Review. (2019).
“Incorporation of Additives and Fibers in Porous Asphalt Mixtures: A Review”
[Anik Gupta Et al.]
- [8] Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 30. (2018).
“Classification of Polymers Used in Polymer-Modified Asphalt for Road Construction: A
Review”

[Y. Guo Et al.]

[9] IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. (2020).

“Assessing the impact of the incorporation of aramid and polyolefin to hot and warm asphaltic

mixtures using dry and wet process: A Review” [G. Daniel]

[10] Construction and Building Materials, Volume 95. (2015).

“Wet process for modifying with styrene-butadiene-styrene (SBS) and polyethylene (PE) Polymers” [Gao Jie Et al.]

[11] MDPI, Materials Article. (2019).

“Influence of Dry Process on the Properties of Asphalt Modified with Styrene-Butadiene-Styrene

Block Copolymer.” [Liu Peiqiang Et al.]

[12] Construction and Building Materials, Volume 93. (2015).

“Chemically modified bitumens with enhanced rheology and adhesion properties to siliceous aggregates” [A.A. Cuadri; P. Partal]

[13] The British Standard Institution. (2018).

BS EN 12697-5:2018 - “Determination of the maximum density”.

[14] The British Standards Institution. (2020).

BS EN 12697-39:2020 - "Binder content by ignition".

[15] The British Standard Institution. (2015).

BS EN 12697-2:2015 - "Determination of the particle size distribution".

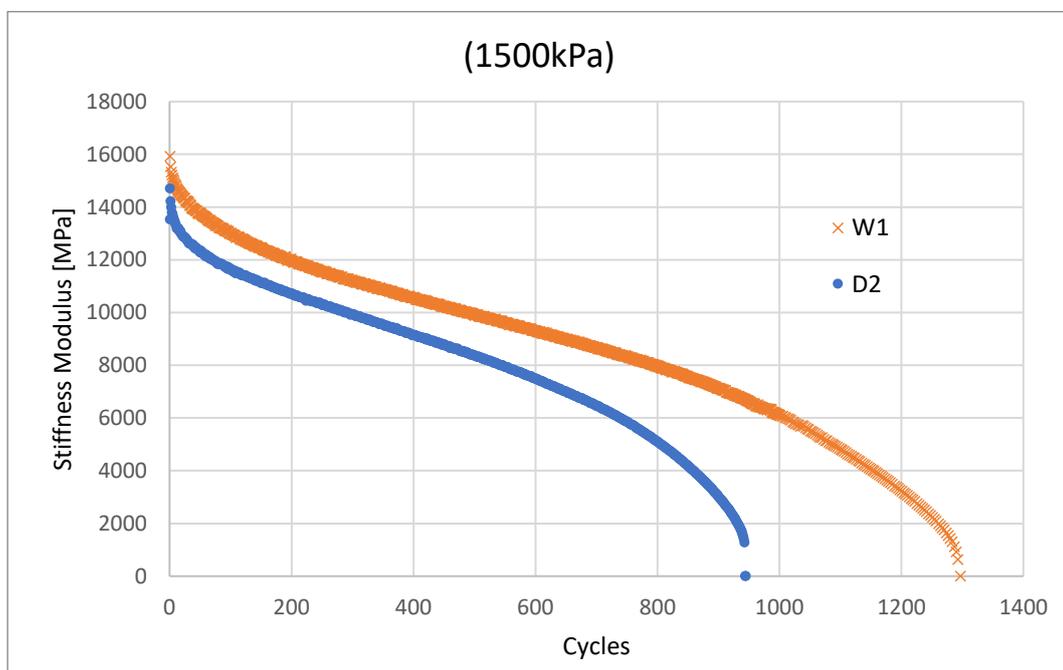
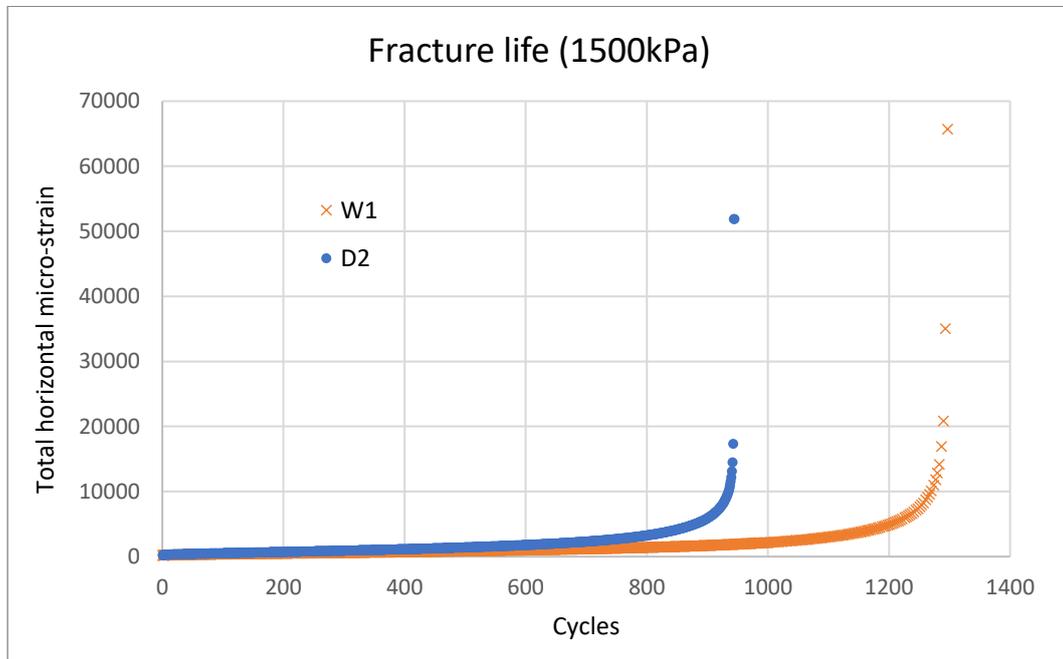
[16] The British Standard Institution. (2019).

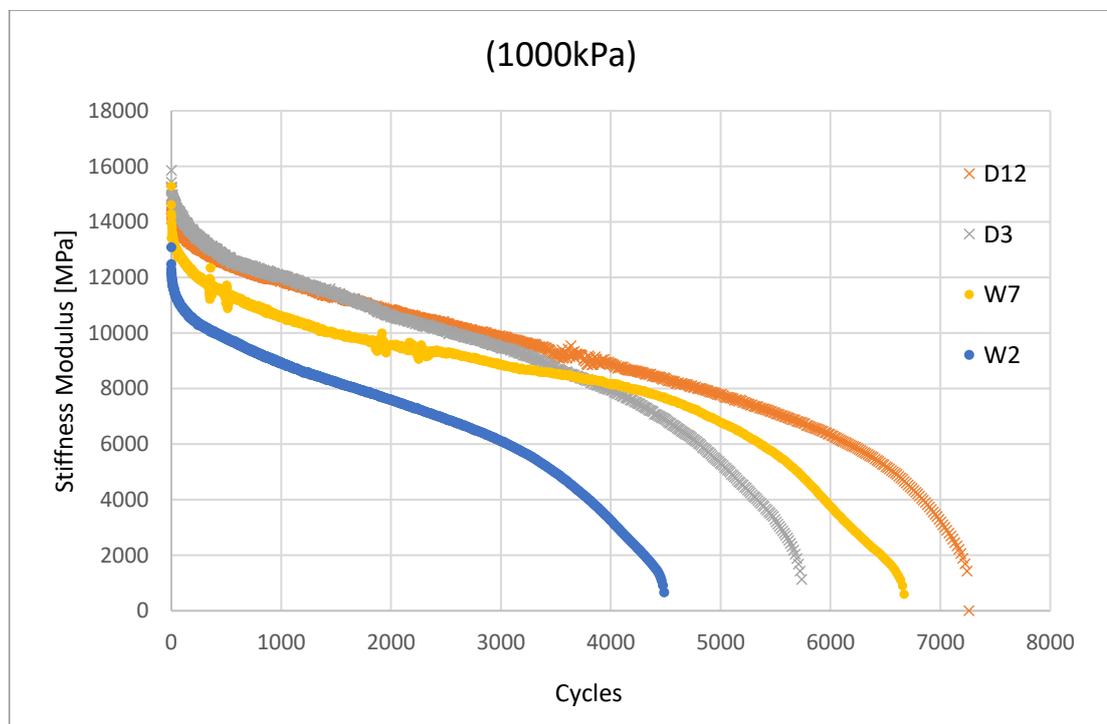
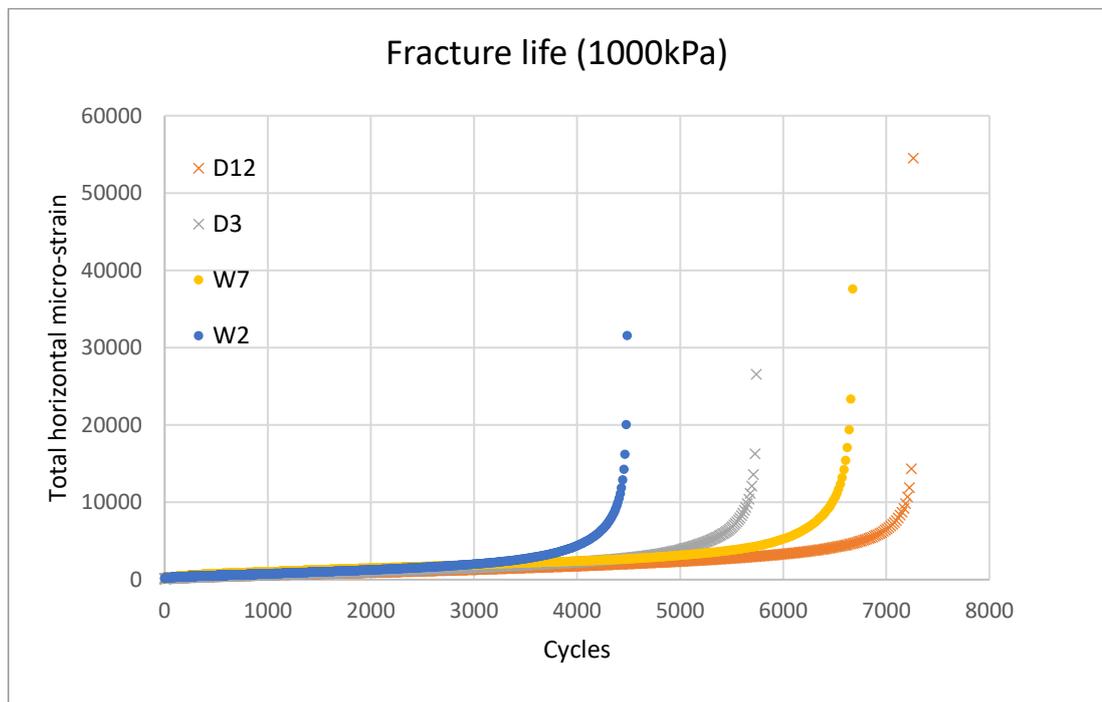
BS EN 12697-31:2019 - "Specimen preparation by gyratory compactor".

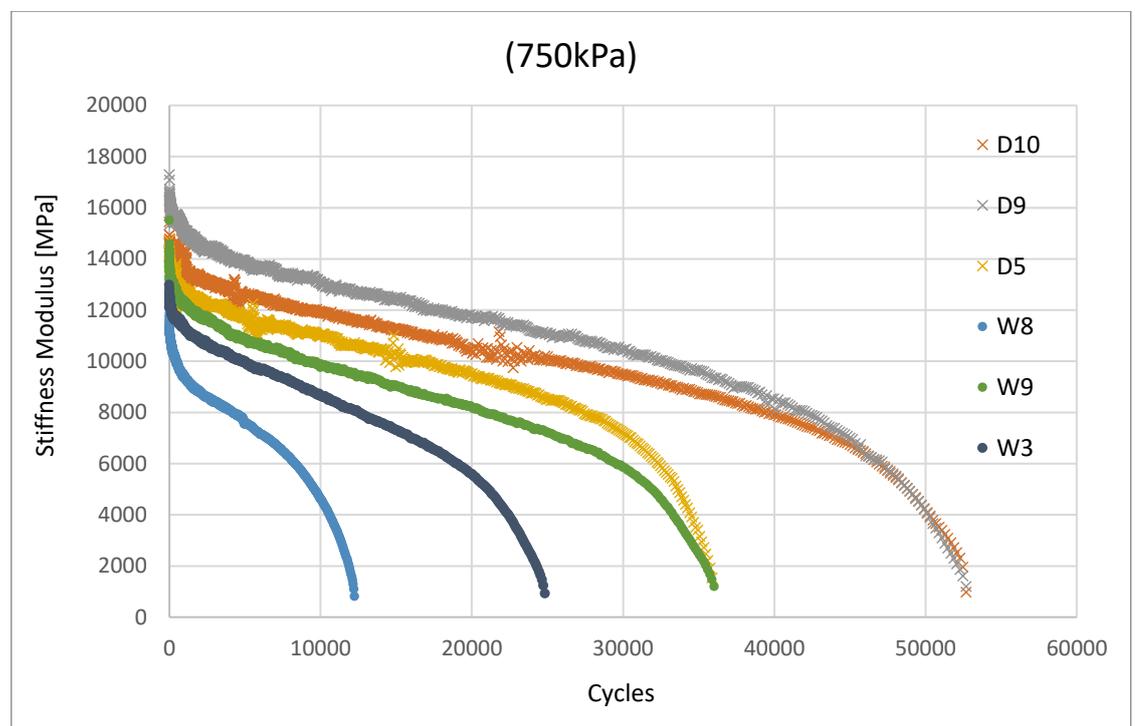
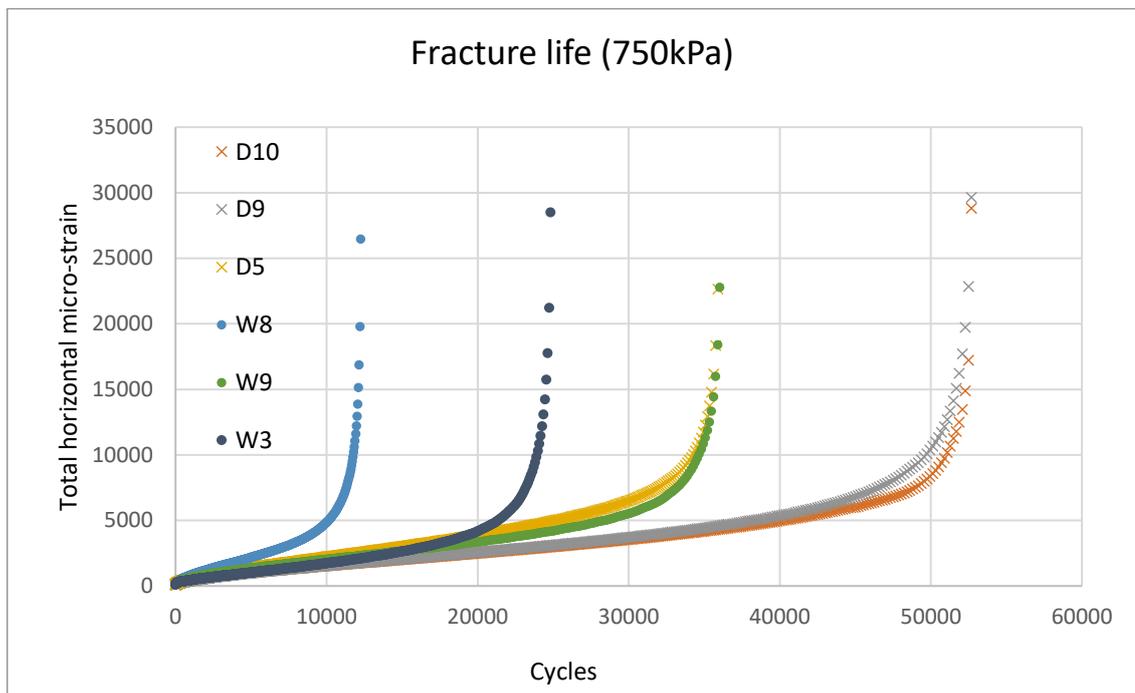
- [17] The British Standard Institution. (2020).
BS EN 12697-6:2020 - "Determination of bulk density of bituminous specimens".
- [18] The British Standard Institution. (2017).
BS EN 12697-23:2017 - "Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens".
- [19] The British Standard Institution. (2018).
BS EN 12697-24:2018 - "Resistance to fatigue".
- [20] 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)".
- [21] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015).
AASHTO T 342-11 "Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)".
- [22] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020).
AASHTO T 378-17 "Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)".
- [23] Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE. (2017).
"Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures" [Yu Qiao Et al.]

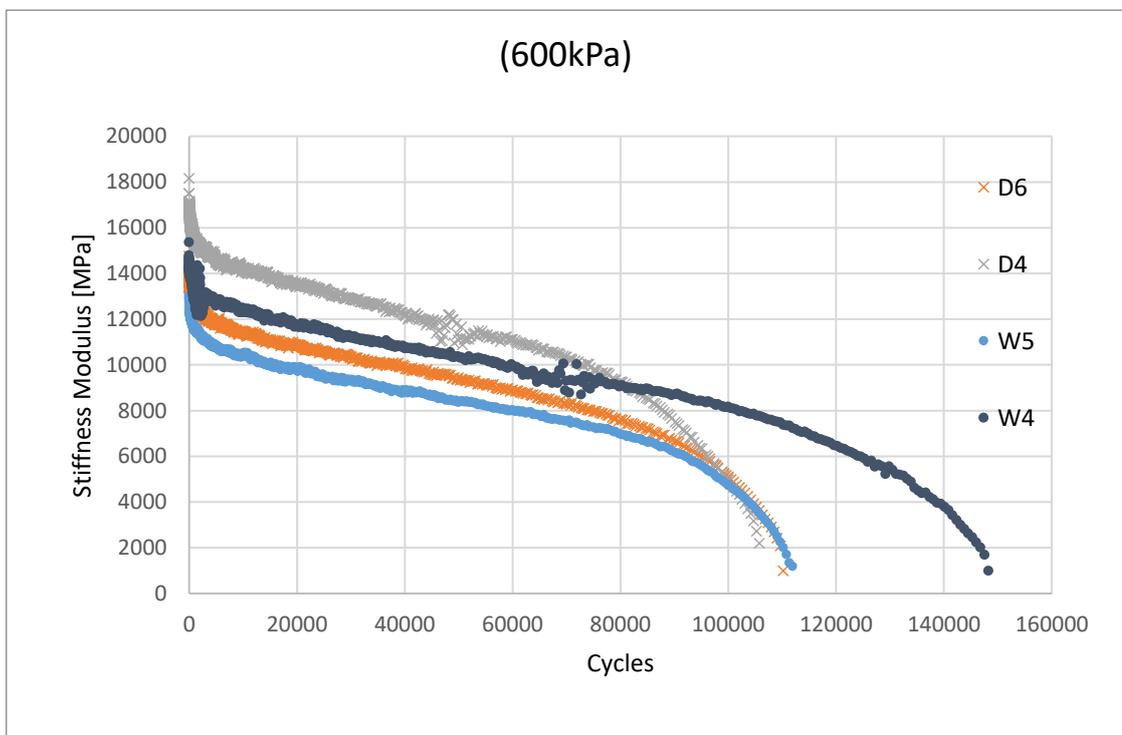
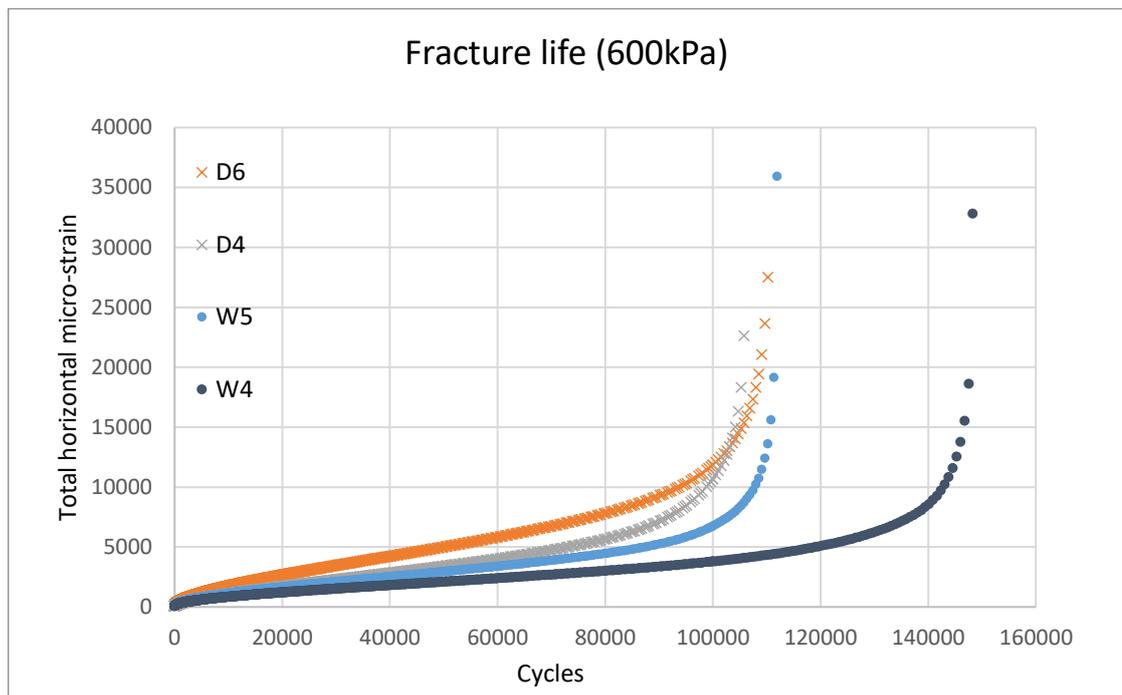
8. Allegati

8.1. Allegato A: Resistenza a fatica





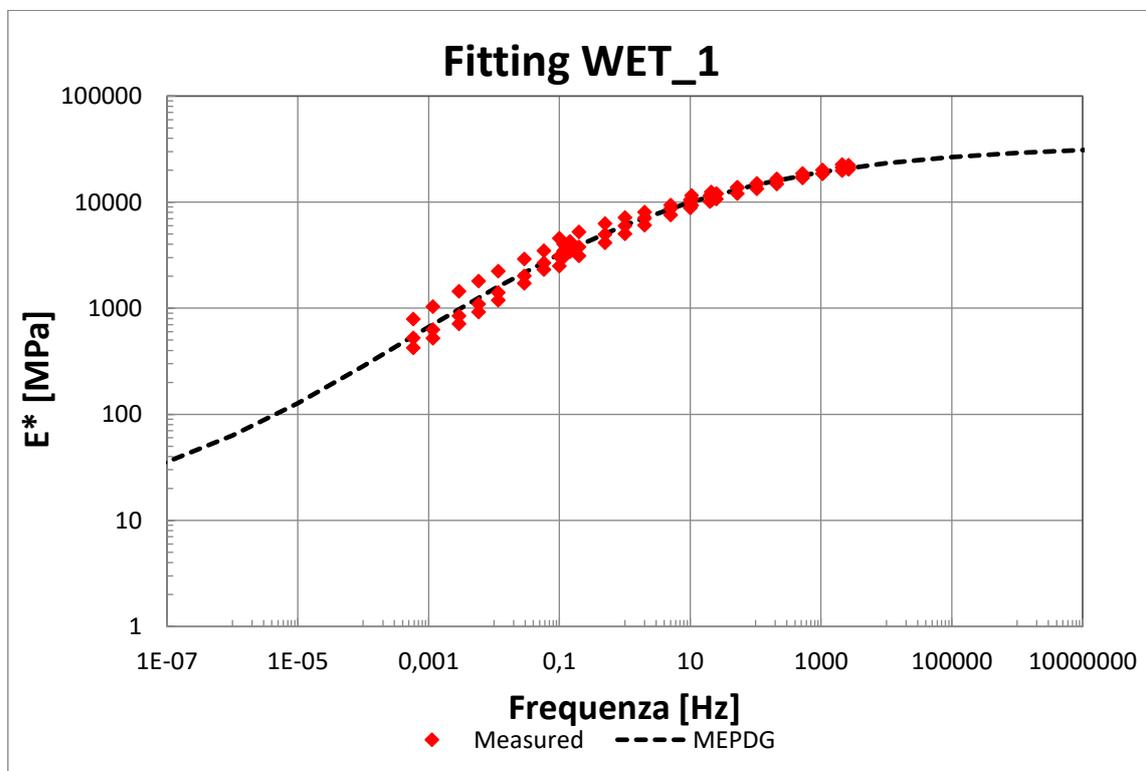


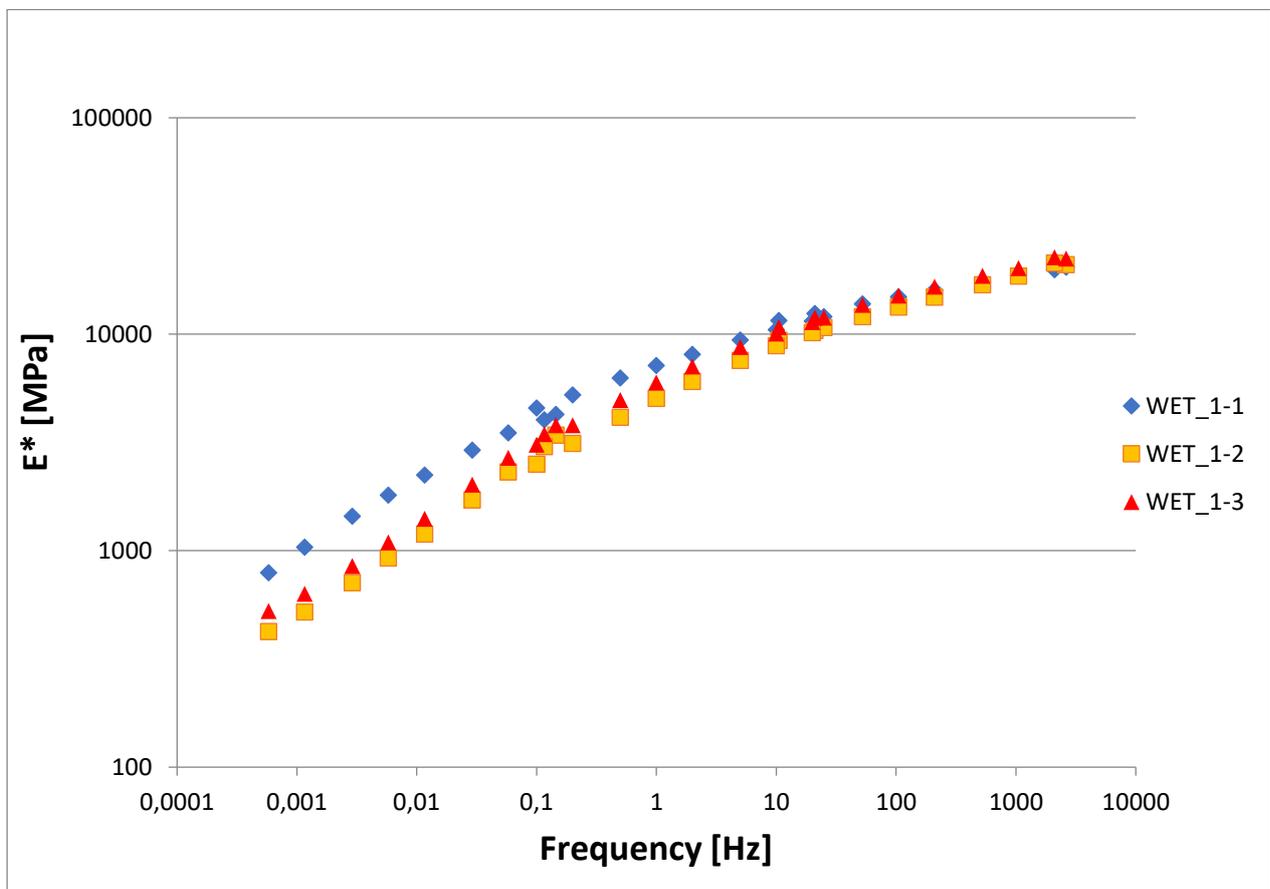
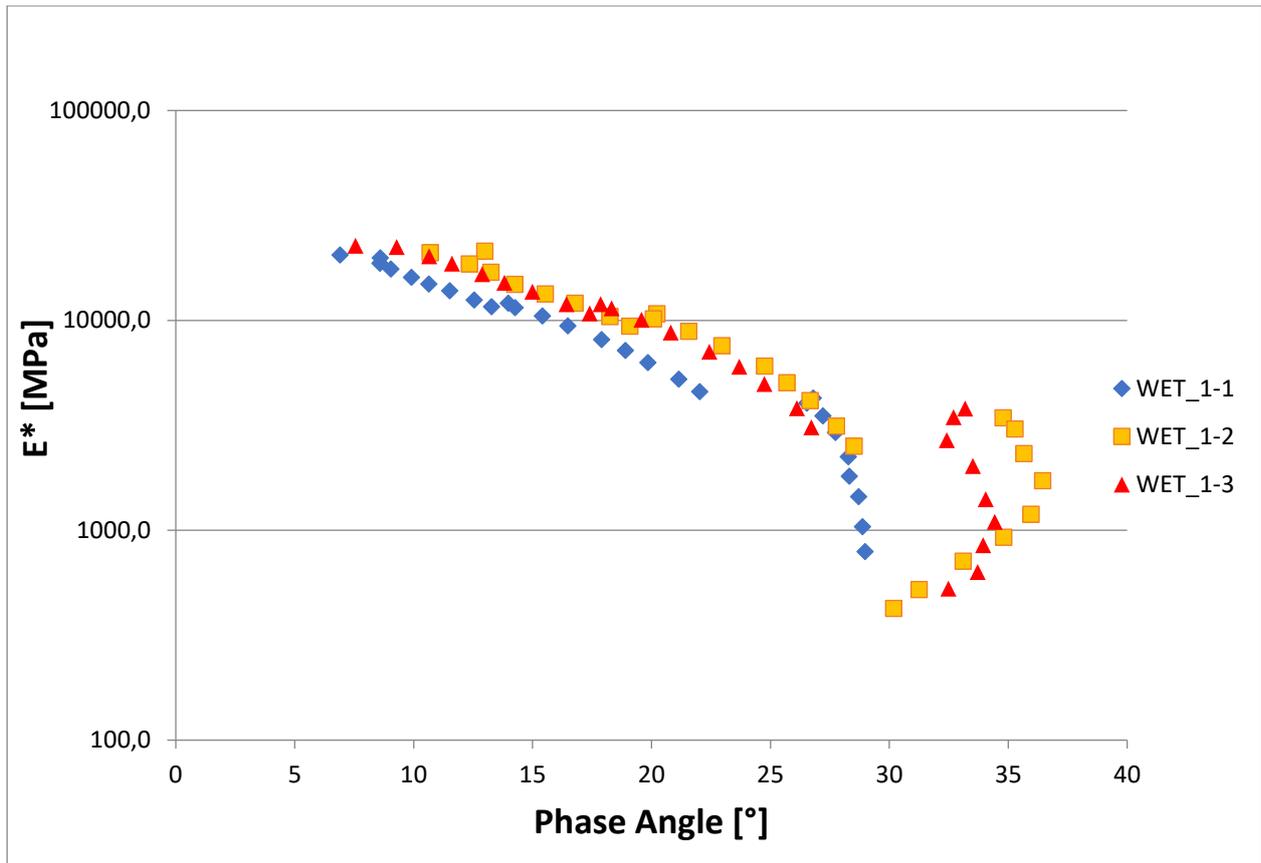


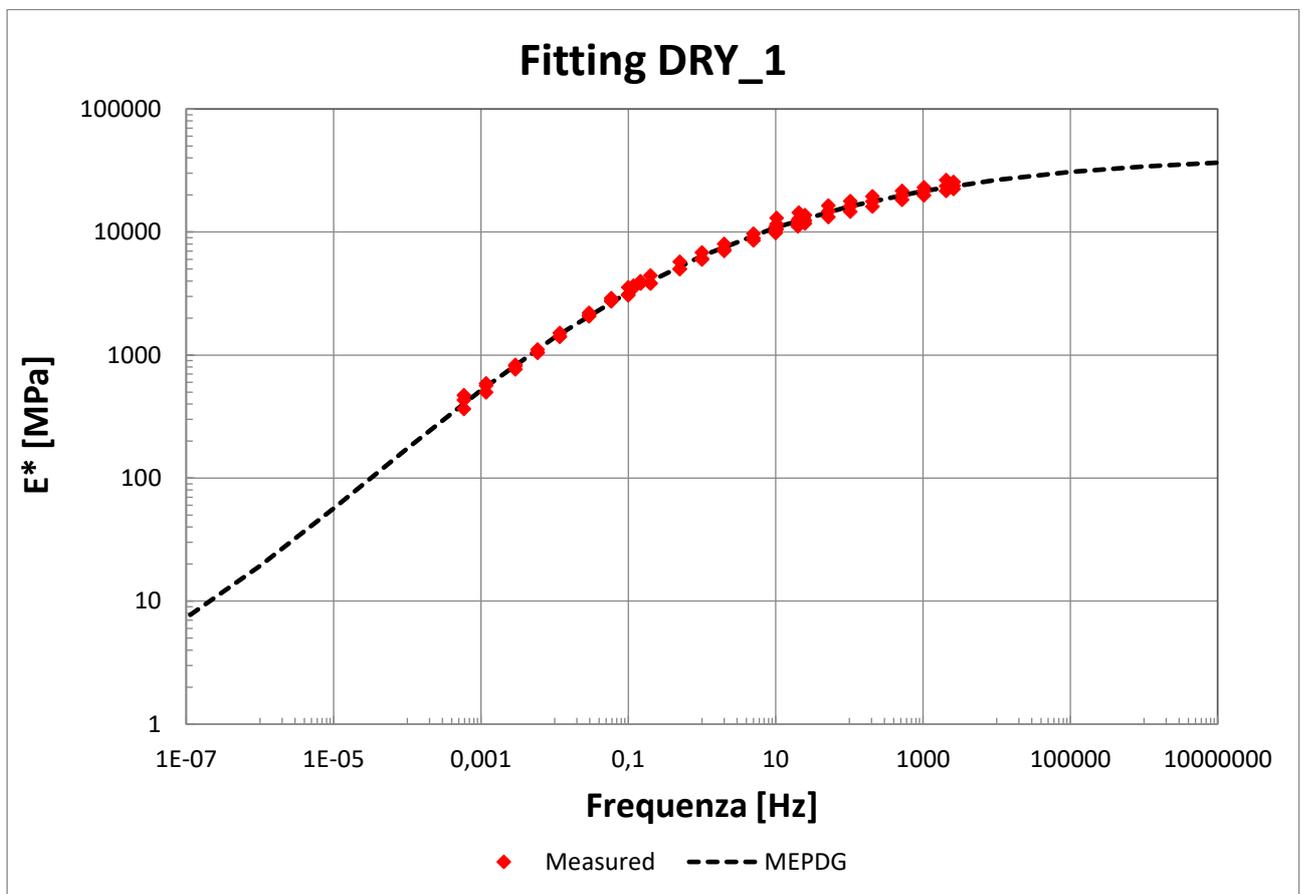
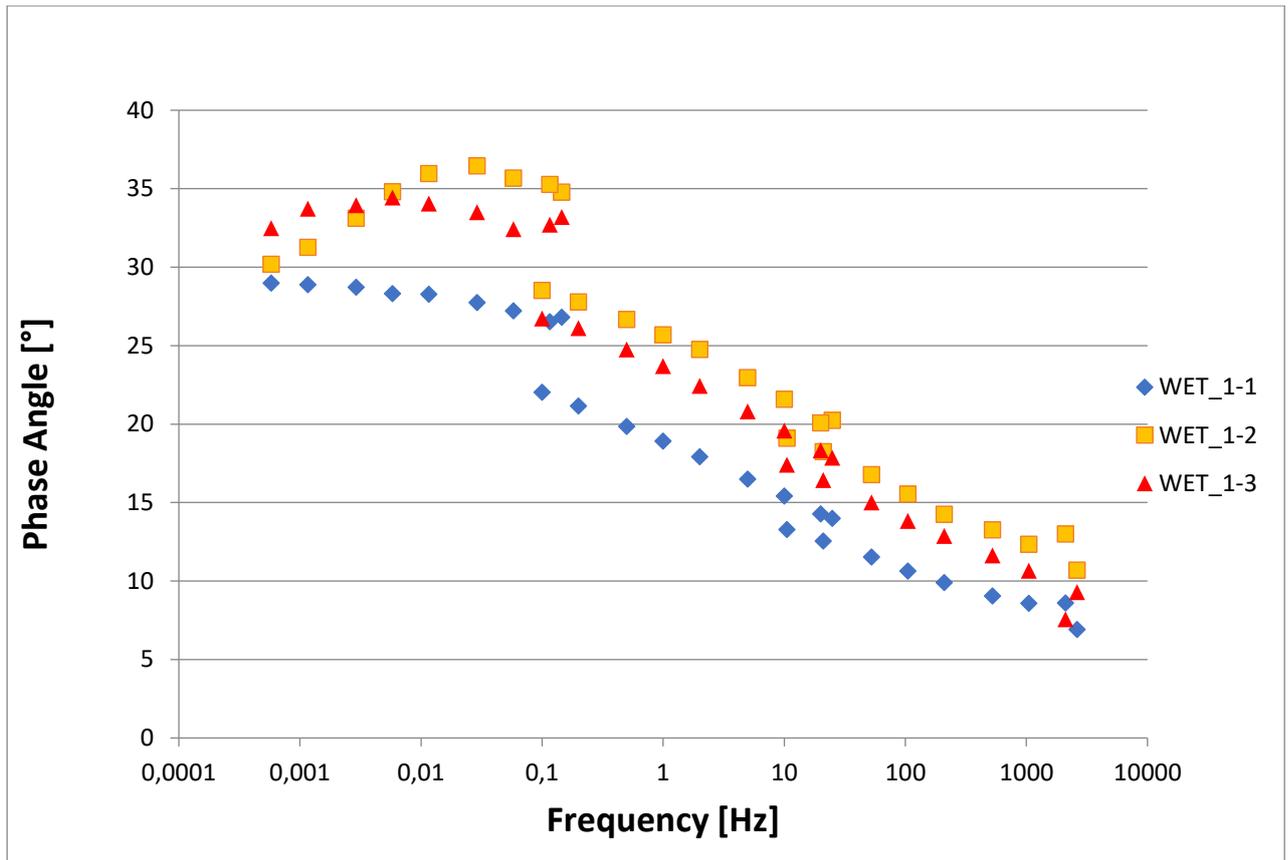
8.2. Allegato B: Modulo dinamico

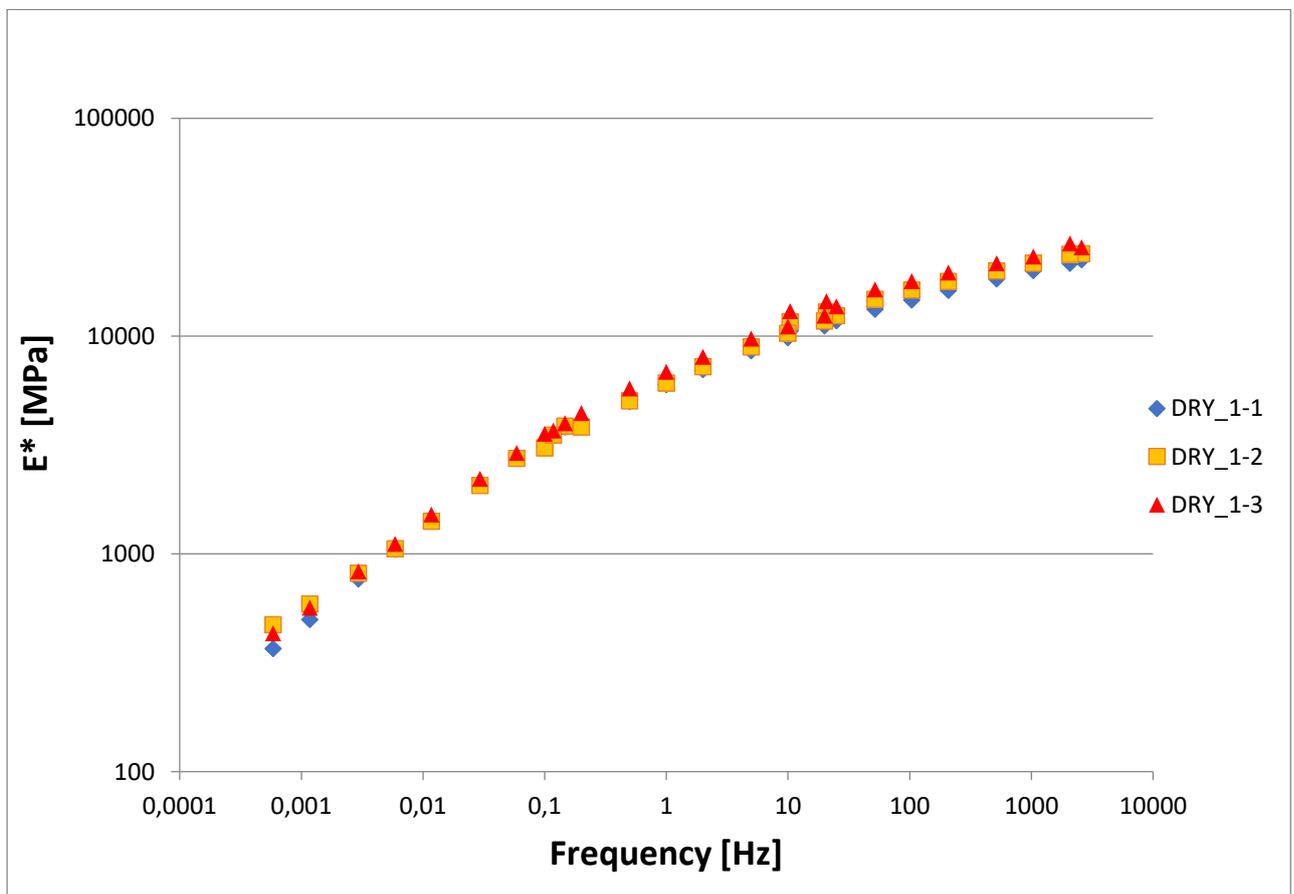
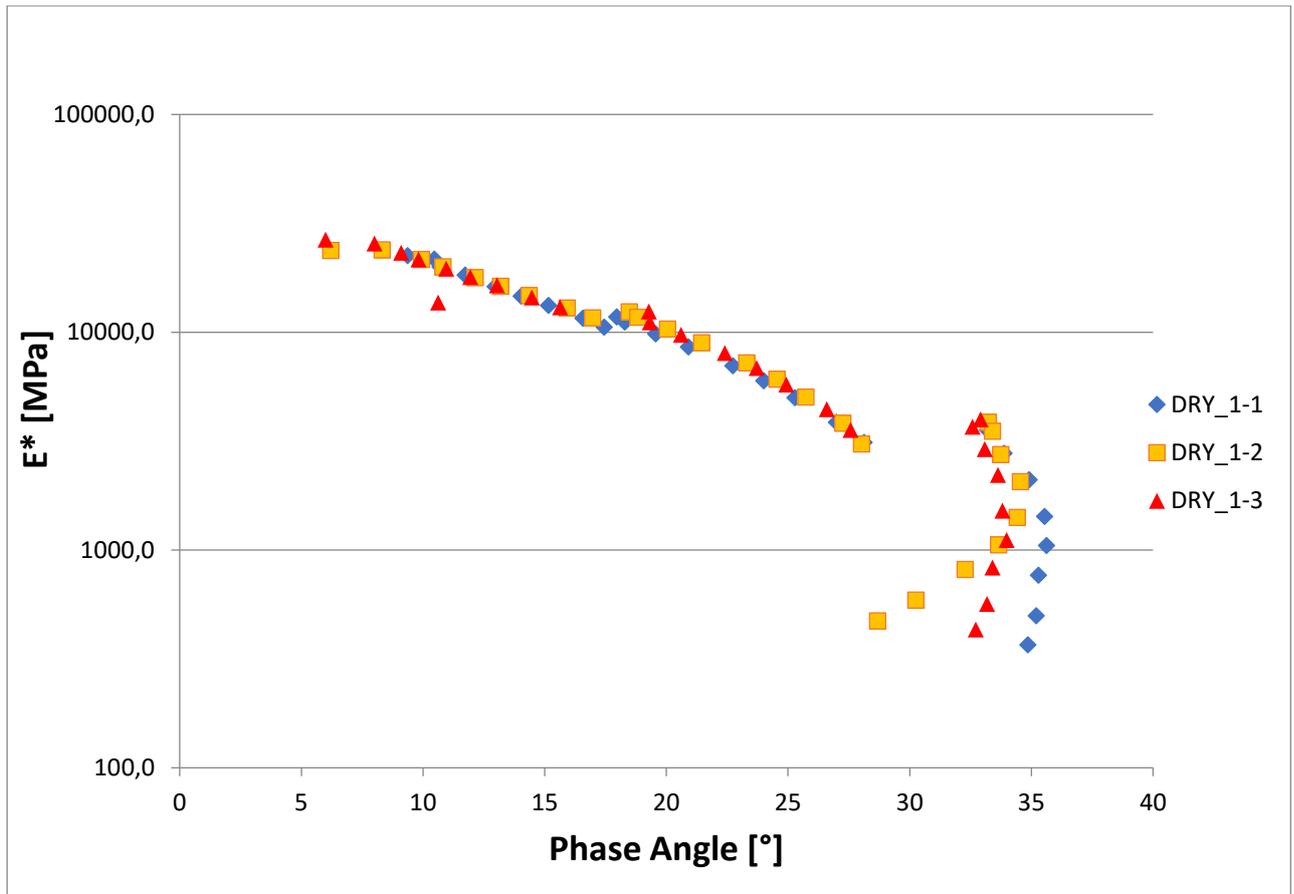
–Confronto 1:

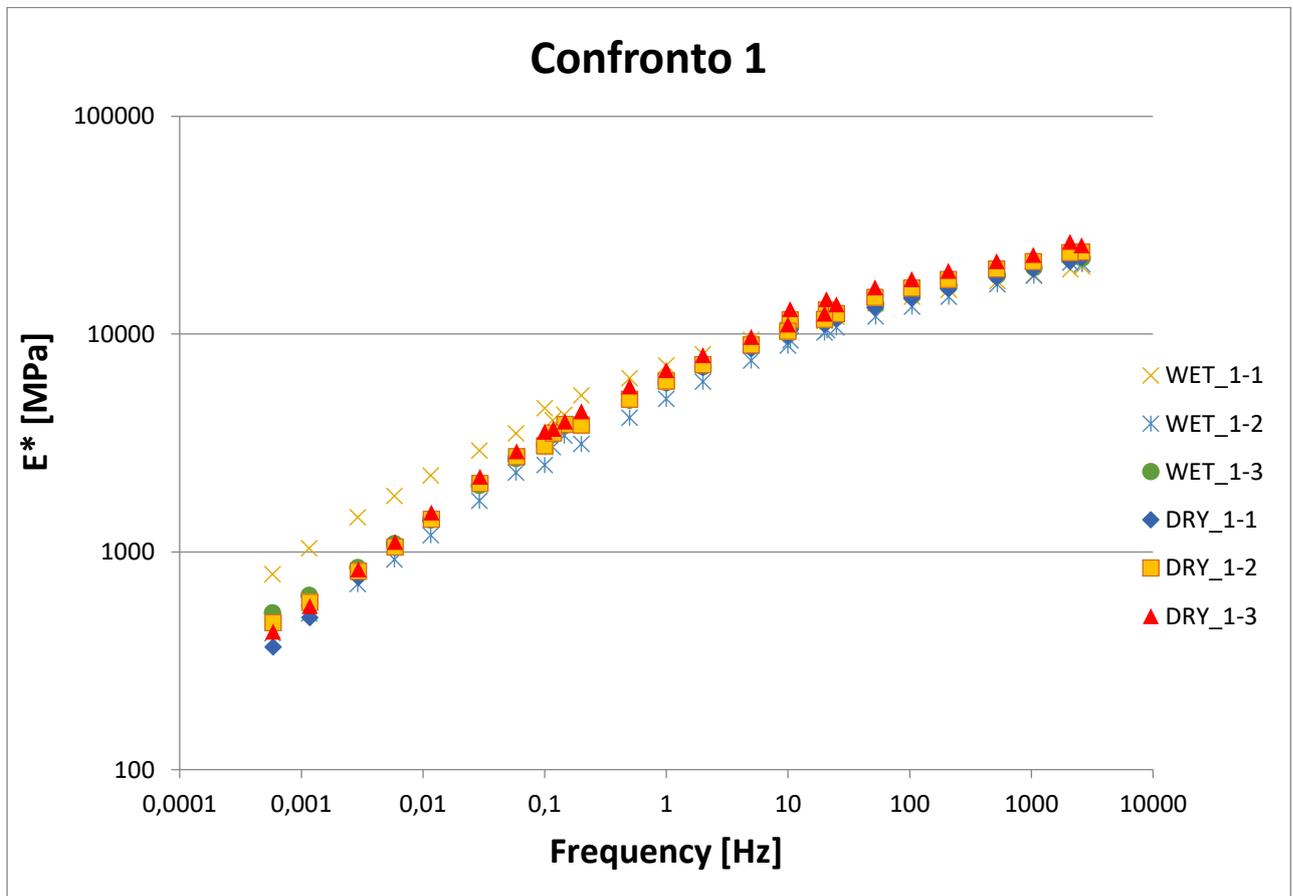
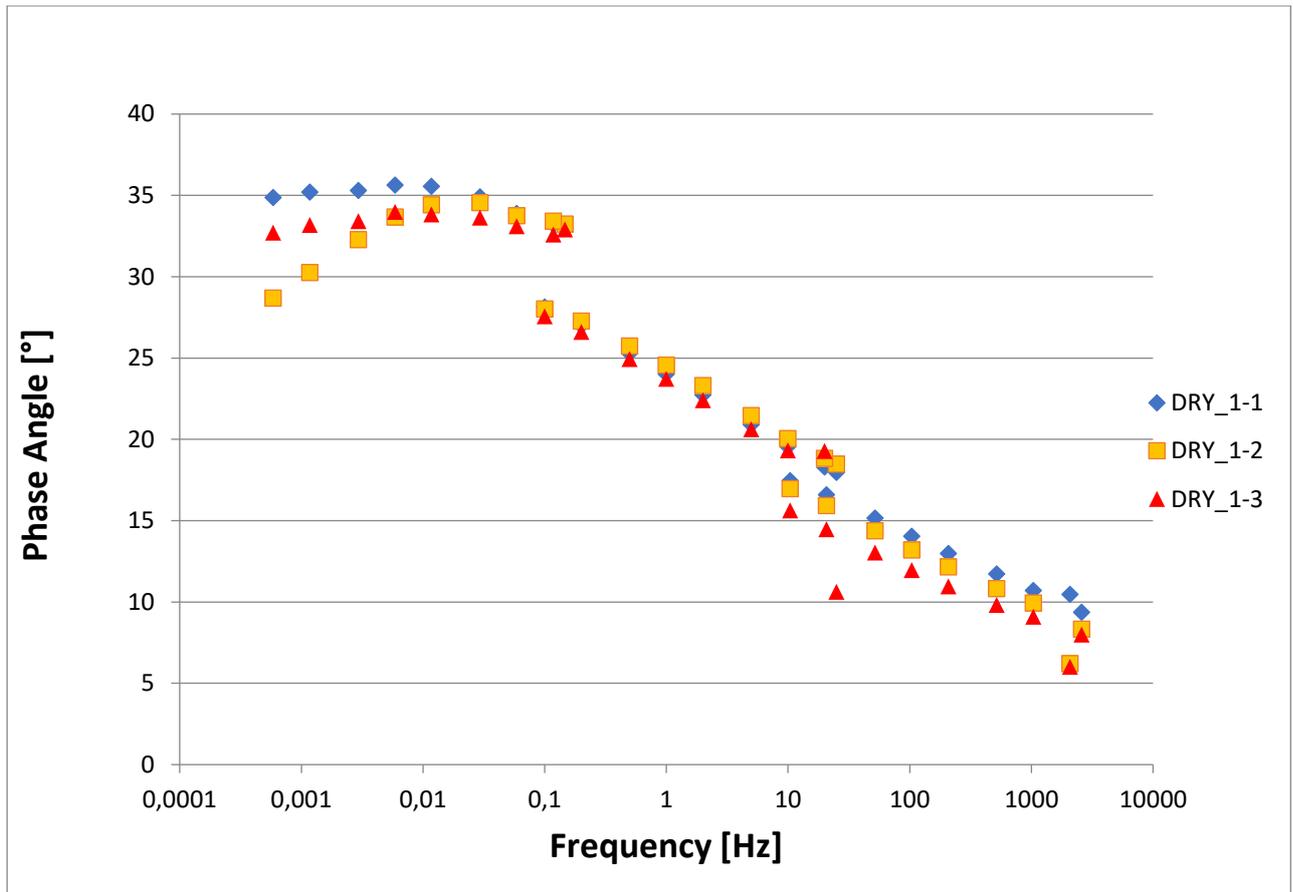
f_r	WET_1	DRY_1
	$ E^* $	$ E^* $
[Hz]	[MPa]	[MPa]
100000000	32437,000	38505,561
10000000	31089,454	36638,004
1000000	29196,166	34101,931
100000	26617,580	30763,698
10000	23259,819	26558,847
1000	19156,962	21577,625
100	14565,248	16151,444
10	9993,088	10864,692
1	6064,911	6400,236
0,1	3227,566	3233,012
0,01	1524,529	1390,072
0,001	664,570	516,911
0,0001	284,203	173,845
0,00001	127,477	56,644
0,000001	63,229	19,314
0,0000001	35,633	7,356
0,00000001	22,860	3,256
0,000000001	16,449	1,693

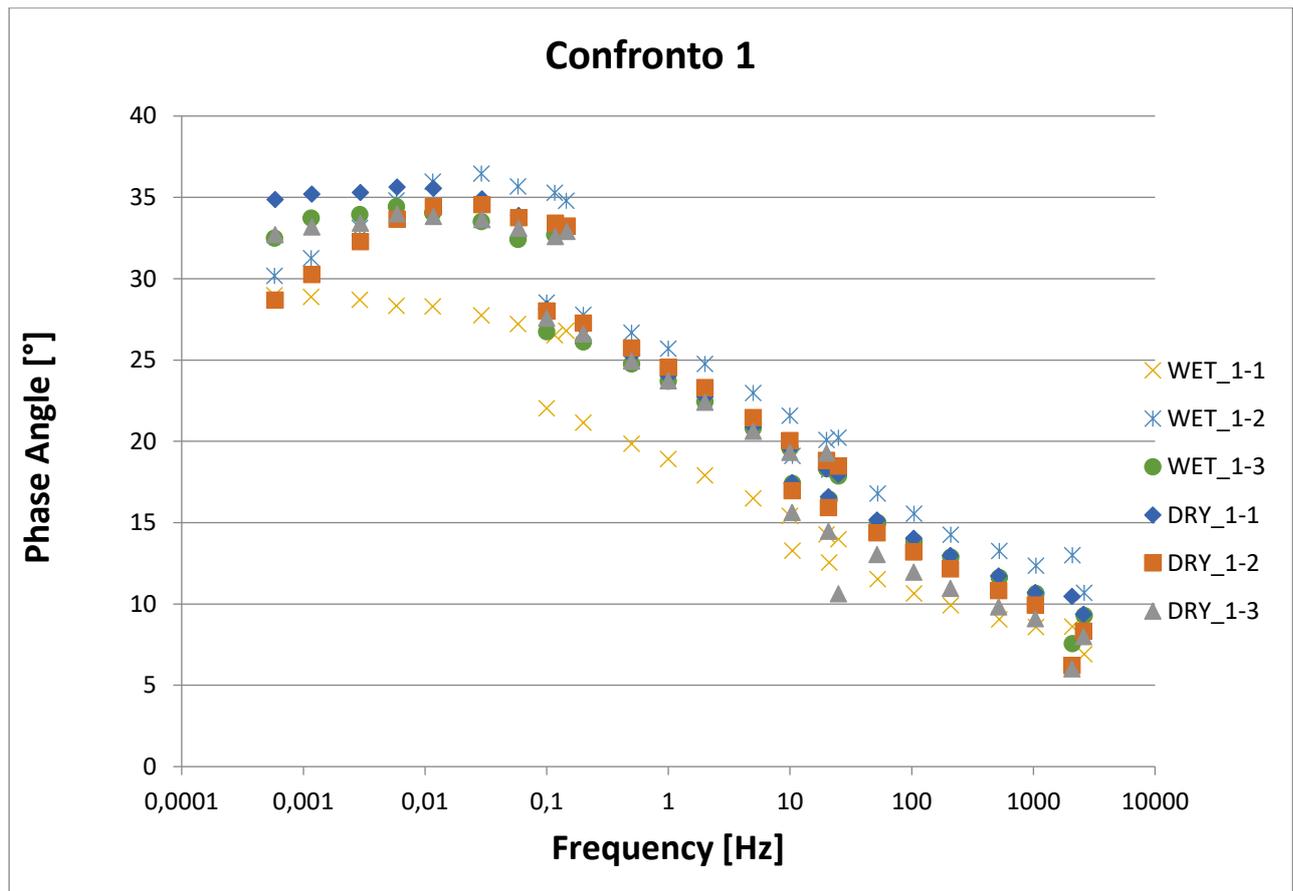






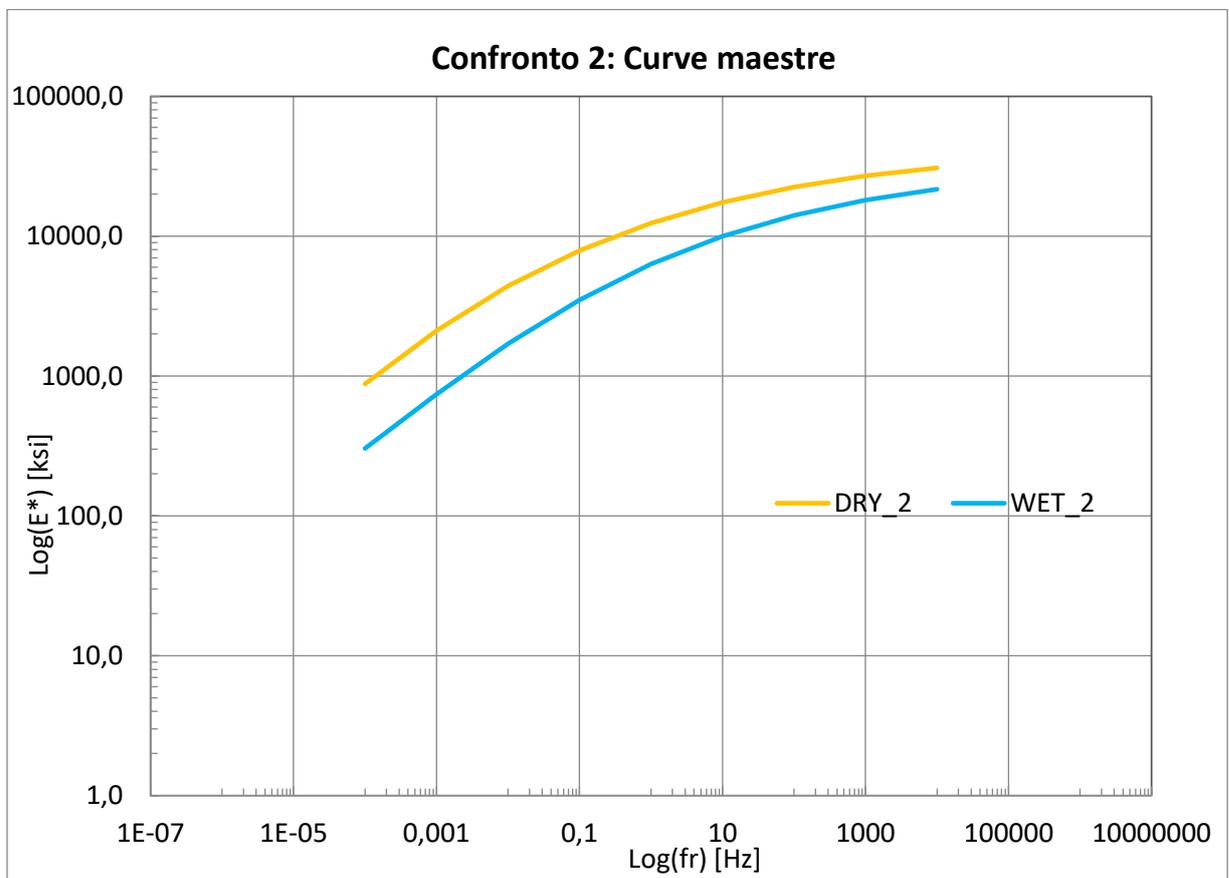
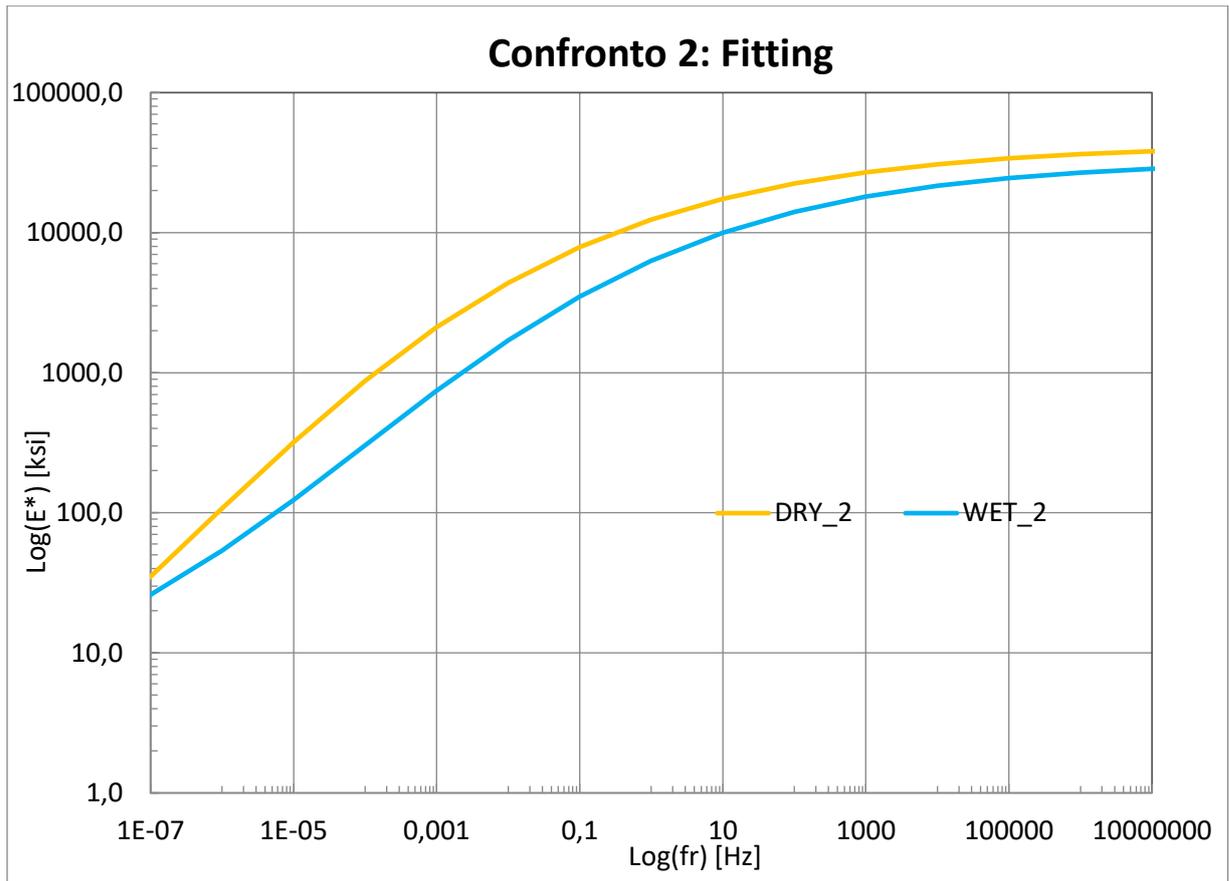






– Confronto 2:

f_r	WET_2	DRY_2
	$ E^* $	$ E^* $
[Hz]	[MPa]	[MPa]
100000000	29740,404	39406,388
10000000	28527,106	38078,051
1000000	26849,700	36279,466
100000	24594,775	33891,332
10000	21682,091	30805,659
1000	18124,583	26966,118
100	14100,950	22428,388
10	9993,271	17424,880
1	6314,884	12390,050
0,1	3503,691	7884,238
0,01	1704,890	4395,003
0,001	743,122	2114,655
0,0001	303,728	877,330
0,00001	123,921	320,093
0,000001	53,755	107,216
0,0000001	25,984	35,052
0,00000001	14,314	11,958
0,000000001	8,985	4,508



Torino, 20/04/2023.

“È doveroso dedicare questo spazio finale della mia tesi di laurea ai ringraziamenti verso tutte le persone che hanno supportato il mio percorso di crescita universitaria e professionale.

Per prima cosa, vorrei ringraziare il mio relatore, il Prof. Davide Dalmazzo, per i suoi preziosi consigli e per la sua disponibilità. Non meno importante è stato l'aiuto del Prof. Pier Paolo Riviera per i suoi consigli puntuali e le sue critiche costruttive. Grazie per avermi fornito spunti fondamentali nella stesura di questo lavoro e per avermi indirizzato nei momenti di indecisione.

*Non posso non ringraziare le persone che hanno avuto più influenza nel mio percorso educativo, la mia famiglia.
Grazie a mia madre, per avermi dato le ali, per avermi lasciato volare e per avermi aiutato a rialzarmi ogni volta che cadevo. Grazie per aver creduto in me.
Vorrei ringraziare mio padre, per essere un esempio di forza, coraggio e gentilezza nella mia vita. Grazie per aver trasmesso in me le tue passioni scientifiche.
A mia sorella, compagna di crescita e di ispirazione nella mia vita.
Grazie per avermi dato la fortuna di poter contare sempre su di te.*

Un ringraziamento speciale va alla mia fidanzata Arianna per essermi stata sempre di supporto. Grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato. Grazie perché ci sei sempre stata.

Infine, vorrei dedicare questo traguardo a me stesso, che possa essere l'inizio di una lunga e brillante carriera professionale.”