



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

**Protocollo innovativo per la prequalifica di additivi
chimici impiegati per la produzione di
conglomerati bituminosi tiepidi**

Innovative protocol for the prequalification of chemical
additives used in the production of Warm Mix Asphalt

Relatore:

Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di laurea di:

Lorenzo Pigliapoco

Indice

Introduzione	4
Capitolo 1: Impiego di additivi chimici nei conglomerati bituminosi tiepidi	6
1.1 Effetti dell'impiego di additivi chimici nei bitumi	8
1.2 Effetti dell'impiego di additivi chimici nelle miscele bituminose tiepide.....	9
Capitolo 2: Indagine sperimentale	11
2.1 Materiali	11
2.1.1 Aggregati	11
2.1.2 Bitume	14
2.1.3 Additivi chimici	15
2.2 Apparecchiature e metodologie di prova	16
2.2.1 Fase 1: leganti	16
2.2.1.1 Viscosimetro rotazionale Brookfield	17
2.2.1.2 Binder Bond Strength (BBS) test	19
2.2.1.3 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT).....	23
2.2.1.4 Pressure Ageing Vessel (PAV)	25
2.2.2 Fase 2: miscele	27
2.2.2.1 Confezionamento delle miscele.....	27
2.2.2.2 Compattazione con pressa giratoria.....	30
2.2.2.3 Determinazione delle proprietà volumetriche	33
2.2.2.4 Studio della lavorabilità.....	34
2.2.2.5 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)	36
2.2.2.6 Prova di trazione indiretta (ITT).....	39
Capitolo 3: Programma sperimentale	41
3.1 Fase 1: leganti.....	41
3.2 Fase 2: miscele	42
Capitolo 4: Analisi dei risultati	44
4.1 Fase 1: leganti	44
4.1.1 Viscosità.....	44
4.1.2 Adesione	54
4.2 Fase 2: miscele	64

4.2.1 Proprietà volumetriche e studio della lavorabilità.....	64
4.2.2 Modulo a trazione indiretta.....	70
4.2.3 Trazione indiretta.....	76
Capitolo 5: Conclusioni.....	87
Bibliografia.....	89

Introduzione

L'attuale contesto storico, contrassegnato da una crescita incessante del costo dell'energia e delle materie prime nel settore delle costruzioni stradali unitamente ad una maggiore sensibilità ed attenzione nei confronti dell'ambiente e della salute dei lavoratori da parte dell'opinione pubblica, sta spingendo i produttori di miscele bituminose a sviluppare alternative più sostenibili capaci, però, di garantire le medesime prestazioni delle miscele tradizionali a caldo (in inglese, *Hot Mix Asphalt*) attualmente in uso.

Con l'introduzione e l'utilizzo dei conglomerati bituminosi tiepidi o, in inglese, *Warm Mix Asphalt* (WMA), si sono ottenuti risultati promettenti nell'ottica delle necessità sopra citate. Tale tecnologia, infatti, permette di garantire una temperatura di produzione, miscelazione e stesa della miscela bituminosa più bassa rispetto a quella tradizionale (riduzione di circa 20÷40 °C) garantendo così vantaggi economici (abbattimento dell'energia richiesta nel processo lavorativo), ambientali (minore produzione di fumi ed emissioni nocive) e tecnico-lavorativi (riduzione tempi di apertura al traffico e migliori condizioni di lavoro legate alle minori emissioni nocive)

Sempre legato al concetto di sostenibilità ambientale ed economica delle miscele bituminose, un ruolo particolarmente importante viene giocato dal fresato o, in inglese, *Reclaimed Asphalt* (RA). Il fresato è un prodotto della demolizione di vecchie pavimentazioni stradali giunte al termine della loro vita utile e/o eccessivamente ammalorate e la sua incorporazione in miscele di nuova produzione permette di ottenere importanti vantaggi economici (minor impiego di bitume vergine e riduzione materiale di scarto destinato allo smaltimento) e ambientali (minori estrazioni di aggregati da cava).

D'altro canto, l'abbattimento della temperatura nella fase di produzione e stesa e l'impiego di fresato (caratterizzato dalla presenza di bitume invecchiato), comporta alcune problematiche tecniche tra cui una minore lavorabilità della miscela bituminosa di nuova produzione e una riduzione dell'adesione bitume-aggregato dovuta alla maggiore umidità nella componente lapidea (a causa delle temperature di riscaldamento più basse) e alla

minore “riattivazione” del bitume invecchiato contenuto nel RA. Per far fronte a questi problemi, nel corso degli anni, sono stati sviluppati diversi tipi di additivi (chimici, organici oppure processi di schiumatura), da dosare all’interno della miscela, che consentono di impiegare la tecnologia WMA garantendo, comunque, soddisfacenti caratteristiche di lavorabilità e adeguate proprietà di adesione tra bitume (invecchiato) e aggregato.

Per le suddette considerazioni, la presente tesi riguarda un lavoro di ricerca sperimentale il cui obiettivo principale è quello di analizzare l’effetto e le potenzialità di sette differenti additivi di tipo chimico attraverso prove di viscosità e di adesione condotte sul bitume (vergine e non) contenente additivo e prove meccaniche e analisi della lavorabilità su campioni di miscele WMA contenenti RA e additivo chimico. Tutte le prove, così come la produzione e compattazione delle miscele bituminose, sono state condotte presso il *Laboratorio di Strade e Trasporti* della Facoltà di Ingegneria dell’Università Politecnica delle Marche di Ancona.

Definito dunque quello che è l’oggetto della sperimentazione e gli obiettivi della stessa, la presente tesi si sviluppa in cinque capitoli:

- Nel primo capitolo (*Impiego di additivi chimici nei conglomerati bituminosi tiepidi*) si esporrà il cosiddetto “stato dell’arte” riguardante il tema della ricerca sperimentale in oggetto, cioè la funzione e l’effetto dell’impiego di additivi nella produzione di conglomerati bituminosi contenenti RA mediante tecnologia WMA;
- Nel secondo capitolo (*Indagine sperimentale*) si descriveranno i materiali impiegati nella sperimentazione, le apparecchiature e le metodologie seguite per l’esecuzione delle prove e l’elaborazione dei risultati;
- Nel terzo capitolo verrà presentato il *Programma sperimentale*, descrivendo le differenti fasi in cui si è sviluppata la ricerca e il numero di prove eseguite sui leganti e sulle miscele;
- Nel quarto capitolo (*Analisi dei risultati*) verranno esposti, analizzati e commentati i risultati ottenuti in laboratorio a seguito delle differenti prove effettuate sui leganti e sulle miscele oggetto di studio;
- Nel quinto capitolo (*Conclusioni*) verranno espone le considerazioni finali riguardanti i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio.

Capitolo 1: Impiego di additivi chimici nei conglomerati bituminosi tiepidi

Negli ultimi decenni, il crescente interesse dell'opinione pubblica e della politica riguardo le tematiche legate alla riduzione dell'impatto ambientale delle produzioni industriali, ha motivato lo sviluppo e il graduale impiego della tecnologia *Warm Mix Asphalt* (WMA) o, in italiano, *conglomerato bituminoso tiepido*. Questa tecnologia permette di produrre conglomerati bituminosi a temperature inferiori rispetto ai tradizionali *Hot Mix Asphalt* (HMA) (diminuzione di 20÷40 °C) o, in italiano, *conglomerati bituminosi caldi*. La diminuzione della temperatura di produzione comporta diversi vantaggi come: il minor consumo di energia per il riscaldamento degli aggregati negli impianti di produzione, la riduzione delle emissioni di fumi e odori (dunque un incremento della sicurezza e delle condizioni di lavoro degli operatori) e la possibilità di introdurre nelle miscele di nuova produzione percentuali significative (anche fino al 60%) di fresato o, in inglese, *Reclaimed Asphalt* (RA), evitando un aggravio delle condizioni di rigidità e ossidazione del bitume invecchiato [1,2]. L'impiego del fresato garantisce, inoltre, ulteriori vantaggi come la significativa riduzione dei costi del conglomerato bituminoso (minor impiego di bitume vergine) e un'ulteriore diminuzione dell'impatto ambientale delle miscele di nuova produzione (minori estrazioni di aggregati da cava e riduzione materiale di scarto destinato allo smaltimento) [2]. Tuttavia, la riduzione della temperatura di produzione del conglomerato bituminoso comporta anche degli inconvenienti come il ridotto rivestimento dell'aggregato, la minore lavorabilità della miscela e la sua maggiore suscettibilità all'acqua per via della minore adesione bitume-aggregato dovuta all'umidità presente negli aggregati vergini [3]. Per far fronte a queste problematiche e per garantire le medesime prestazioni meccaniche delle miscele tradizionali a caldo, si può ricorrere all'impiego di additivi da dosare durante la produzione in impianto [3,4]. Gli additivi attualmente in commercio si possono suddividere in tre differenti tipi ovvero: organici (cere), chimici e processi di schiumatura [5].

Gli additivi organici sono costituiti da cere sintetiche che possono essere inserite nel bitume o direttamente nella fase di impasto della miscela in impianto e si compongono di catene medio lunghe di idrocarburi ad alto peso molecolare con punto di fusione generalmente compreso tra 80÷120 °C. Superato tale punto le cere fondono andando così a ridurre la viscosità del bitume e migliorando la lavorabilità dell'impasto [5,6]. La tipologia di cera da utilizzare deve essere attentamente selezionata onde evitare problemi legati alla temperatura in fase di servizio [7]. Più specificatamente, se il punto di fusione della cera è inferiore a quella di servizio, la resistenza della pavimentazione risulterà gravemente compromessa [8]. Man mano che la miscela si raffredda, queste cere tendono a solidificare in particelle di dimensioni microscopiche e a distribuirsi uniformemente garantendo un aumento della rigidità del legante e di conseguenza la riduzione della tendenza all'ormaiamento soprattutto per temperature di servizio medio alte. Di contro però, può verificarsi un infragilimento eccessivo del materiale a temperature medio basse, penalizzando il comportamento a fatica ed aumentando la tendenza a fessurazione [6,7].

I processi di schiumatura, invece, consistono nell'aggiunta di piccole quantità di acqua iniettate direttamente nel bitume caldo, oppure nella camera di miscelazione con gli aggregati [9]. L'acqua, mescolata con il bitume caldo, evapora e il vapore liberato, rimanendo intrappolato all'interno dell'impasto, genera delle microbolle che provocano la schiumatura del legante. Questo processo comporta una espansione volumetrica del bitume che ne riduce la viscosità, garantendo una maggiore lavorabilità della miscela. Tuttavia, l'effetto di schiumatura è limitato nel tempo e, dopo breve periodo, la schiuma collassa vincolando significativamente le tempistiche di stesa e compattazione [10].

Per quanto riguarda invece gli additivi chimici, essi includono combinazioni di emulsionanti, tensioattivi, polimeri e promotori di adesione in grado di migliorare il rivestimento degli aggregati, la lavorabilità dell'impasto e la compattazione. Questi additivi sono aggiunti solitamente in percentuale al legante (bitume) o, in alternativa, dosati sul peso di fresato inserito in miscela. L'aggiunta avviene, in entrambi i casi, prima che il bitume venga miscelato con gli aggregati caldi e si possono distinguere due differenti meccanismi di funzionamento: gli additivi composti prevalentemente da emulsionanti agiscono a livello microscopico nell'interfaccia tra bitume e aggregato andando a regolare e ridurre le forze di attrito che si creano permettendo alle particelle di bitume di spostarsi più facilmente l'una

sull'altra nella fase di stesa e compattazione, mentre quelli a base di tensioattivi agiscono riducendo la viscosità del bitume [11,12].

1.1 Effetti dell'impiego di additivi chimici nei bitumi

Il bitume è un materiale viscoelasto-plastico le cui caratteristiche sono fortemente influenzate dalla temperatura in cui si trova. Per ottenere le prestazioni ottimali della miscela bituminosa e garantire un rivestimento adeguato degli aggregati, è essenziale selezionare attentamente la temperatura di riscaldamento del legante che, in generale, nelle miscele bituminose HMA, è compresa tra i 160 e i 170 °C in funzione della presenza di bitume modificato (*polymer-modified bitumens*, PmBs) o meno. Adottando la tecnologia WMA, durante la fase di miscelazione (che prevede una temperatura tipicamente compresa tra 100 e 150 °C [6]), il bitume opportunatamente riscaldato entra in contatto con gli aggregati lapidei (caratterizzati da temperature di riscaldamento più basse) e, per scambio termico, diminuisce la sua temperatura cambiando, di conseguenza, il suo comportamento reologico. La ridotta temperatura comporta dunque un aumento della rigidità del bitume e, conseguentemente, una minore adesione tra il legante e l'aggregato. Tuttavia, la più bassa temperatura a cui viene a trovarsi il bitume, comporta anche vantaggi come il minor invecchiamento a breve termine (legato alla fase di impasto, trasporto, stesa e compattazione) del legante vergine di aggiunta e della quota parte proveniente dal RA. L'invecchiamento del bitume è un processo che coinvolge meccanismi reversibili (riorganizzazione delle molecole) e irreversibili (cambiamenti chimici legati a processi di ossidazione e volatilizzazione) [13] e influenza fortemente il suo comportamento meccanico. È noto che l'invecchiamento porta ad un irrigidimento del bitume e, di conseguenza, ad un comportamento più fragile della miscela aumentando così il rischio di fessurazioni per fatica [14,15]. Particolare attenzione va posta, poi, nei confronti del bitume contenuto all'interno del RA, il quale risulta già essere fortemente invecchiato (oltre all'invecchiamento a breve termine si aggiunge quello a lungo termine legato ai fattori climatici a cui è stato sottoposto in servizio). Introducendo dunque RA nella miscela calda, il bitume in esso contenuto subisce, per scambio termico, un'ulteriore esposizione ad alte temperature e dunque un

ulteriore invecchiamento e, di conseguenza, irrigidimento. Adottando dunque la tecnologia WMA, invece della tradizionale HMA, è possibile ridurre questo tipo di invecchiamento garantendo, così, una migliore lavorabilità e riducendo la rigidità finale della miscela [16,17]. A tal proposito, come ormai noto nella letteratura scientifica del settore [18], l'uso di additivi chimici permette di migliorare la risposta elastica del bitume e di promuovere l'adesione bitume-aggregato riducendo così la suscettibilità all'acqua. Tuttavia, a seguito del ridotto invecchiamento del bitume, la resistenza alla deformazione permanente (ormaiamento) potrebbe ridursi [19]. In termini di viscosità del bitume, è possibile osservare una generale diminuzione della stessa per qualsiasi tipologia di additivo chimico dosato. Il contributo risulta essere significativamente incrementato per gli additivi chimici tensioattivi mentre, per quelli emulsionanti, la diminuzione è minima [11,12,20]. Analizzando invece l'adesione bitume-aggregato, la ridotta temperatura prevista dalla tecnologia WMA comporta un minore essiccamento della componente lapidea e, di conseguenza, un maggiore contenuto di umidità (acqua contenuta nell'aggregato). Poiché il bitume presenta minore affinità all'acqua rispetto all'aggregato, attraverso l'uso di additivi chimici contenenti tensioattivi, è possibile incrementare l'adesione bitume-aggregato. Essi, infatti, agiscono come da ponte tra bitume e la superficie dell'aggregato spostando l'acqua dall'interfaccia (i gruppi di testa si legano alla superficie dell'aggregato stesso mentre, le code idrocarburiche delle molecole, sono compatibili al legante) [21].

1.2 Effetti dell'impiego di additivi chimici nelle miscele bituminose tiepide

Una delle conseguenze della riduzione della temperatura di miscelazione del conglomerato bituminoso tiepido (tecnologia WMA) risulta essere la minore lavorabilità della miscela che può comportare delle difficoltà tecniche durante la fase di compattazione in sito. Tuttavia, l'impiego di additivi chimici si è dimostrato efficace nel mitigare questo tipo di problema ed è noto che un corretto dosaggio degli stessi, durante la fase di miscelazione in impianto, permette di migliorare la compattabilità delle miscele stessa. Studi riguardanti le miscele WMA, infatti, hanno dimostrato come l'impiego di additivi chimici ha permesso di ottenere

miscele caratterizzate da una compattabilità (rappresentata dal parametro CEI, *Compaction Energy Index*) confrontabile con quella dei tradizionali HMA [22,23]. La compattabilità della miscela è un parametro estremamente importante poiché influenza il contenuto di vuoti. Infatti, è stato dimostrato che una insufficiente compattazione della miscela comporta una eccessiva percentuale di vuoti rendendo la pavimentazione maggiormente suscettibile alle infiltrazioni di acqua e alla formazione di crepe diminuendo, di conseguenza, le sue prestazioni a lungo termine [24]. Si è inoltre osservato che anche le prestazioni a breve termine risultano essere fortemente compromesse in caso di eccessiva presenza di vuoti, i quali comportano un aumento dei cedimenti verticali a seguito del consolidamento del conglomerato sotto l'azione dei carichi veicolari post riapertura del tratto stradale [25]. La tecnologia WMA, inoltre, grazie alla minore temperatura in fase di produzione, permette di inserire all'interno della miscela anche elevate percentuali di RA (fino al 60%) [26] senza andare incontro ad eccessivo irrigidimento della miscela (ridotto invecchiamento del bitume contenuto nel RA). L'utilizzo di ringiovanente, poi, permette di garantire, anche ad alti dosaggi di RA, un adeguato rivestimento dell'aggregato (minimo richiesto 95%) [27]. Si è inoltre osservato come la presenza di RA nella miscela (anche in assenza di additivo), dà luogo a una maggiore resistenza all'ormaiamento e una minore suscettibilità all'umidità rispetto una miscela WMA con assenza di RA [2]. È inoltre noto [23,28] che, l'utilizzo di additivo permette di aumentare la resistenza a trazione indiretta (ITS) e il modulo elastico (ITSM) rispetto a miscele WMA non additivate. Inoltre, l'esperienza sperimentale di Ragni et al. [19], ha dimostrato che il minor invecchiamento a breve termine dovuto alla tecnologia WMA e l'impiego di additivi chimici, può avere un impatto positivo sulle prestazioni delle miscele bituminose, aumentando la resistenza alla fatica (capacità della pavimentazione di resistere a carichi inferiori rispetto alla resistenza ultima del materiale ma, applicati ciclicamente) e alla fessurazione termica (capacità della pavimentazione di resistere alla variazione di temperatura la quale genera elevati stati tensionali di trazione nel conglomerato). Le prestazioni della miscela risultano comunque essere fortemente dipendenti dalla tipologia di additivo utilizzato [27].

Capitolo 2: Indagine sperimentale

Nel presente capitolo verranno descritti i materiali impiegati nella sperimentazione, le apparecchiature e le metodologie seguite per l'esecuzione delle prove e l'elaborazione dei dati ottenuti dalle stesse.

2.1 Materiali

In questo paragrafo saranno illustrati tutti i materiali impiegati nella sperimentazione per lo studio delle caratteristiche di viscosità e adesione dei bitumi e il confezionamento delle miscele di conglomerato. I materiali utilizzati sono i seguenti:

- aggregati vergini calcarei di varia pezzatura;
- aggregato vergine basaltico per prove di adesione;
- fresato (RA);
- filler calcareo;
- bitume modificato con stirene-butadiene-stirene (SBS);
- additivi chimici.

Di seguito, si procede ad una descrizione più specifica e dettagliata dei materiali utilizzati nella sperimentazione.

2.1.1 Aggregati

Gli aggregati sono i materiali principali delle miscele stradali e devono il loro nome alla loro natura granulare (il granulo è un elemento solido separabile senza esercitare un'azione di frantumazione). Gli aggregati, costituiti da particelle granulari, rappresentano la fase solida dei conglomerati bituminosi e possono essere distinti o in base alla loro pezzatura o per la

loro provenienza (natura). Gli aggregati per conglomerati bituminosi possono essere naturali, artificiali (industriali) o riciclati.

Nella sperimentazione in questione, per la realizzazione delle miscele bituminose *dense-graded* (DG), sono stati utilizzati sia aggregati vergini di primo impiego e di varia pezzatura, sia aggregato riciclato. Gli aggregati riciclati sono materiali derivanti dalla rimozione e frantumazione di pavimentazioni esistenti ammalorate da cui si ottiene il cosiddetto fresato o, in inglese, *Reclaimed Asphalt* (RA). Il fresato si compone di aggregati rivestiti da bitume invecchiato ed è caratterizzato da una propria curva granulometrica composta principalmente da un'elevata percentuale di inerti di piccola pezzatura (fini) dovuti al processo di frantumazione a cui è sottoposto.

Pertanto, il materiale lapideo utilizzato per le miscele in esame si compone di:

- calcare 0/4 (Figura 2.1)
- calcare 10/20 (Figura 2.2)
- calcare 20/32 (Figura 2.3)
- filler calcareo (Figura 2.4)
- fresato 0/14 (Figura 2.5)



Figura 2.1 calcare 0/4



Figura 2.2 calcare 10/20



Figura 2.3 calcareo 20/32



Figura 2.4 filler calcareo



Figura 2.5 fresato 0/14

Per la prova di adesione, invece, sono stati utilizzati dischi basaltici ottenuti attraverso taglio con sega circolare (Figura 2.6).



Figura 2.6 dischi in basalto per prova di adesione (BBS)

2.1.2 Bitume

Il bitume è un legante idrocarburico, di colore bruno o nerastro, che deriva dalla distillazione e raffinazione del greggio e risulta essere fortemente termo-dipendente, cioè, risente delle variazioni di temperatura a cui è sottoposto variando di consistenza e comportamento. Esso può, infatti, essere solido o semi-solido a temperatura ambiente (esercizio) ed essere liquido ad alte temperature (produzione della miscela). Le proprietà meccaniche e fisiche del legante bituminoso sono fortemente dipendenti dalla composizione chimica e strutturale del greggio utilizzato nel processo di produzione. Il bitume così ottenuto dai processi di distillazione e raffinazione può essere utilizzato “tal quale” (bitume tradizionale) oppure sottoposto a processi di modifica (bitume modificato) con il fine di migliorare le sue capacità prestazionali e reologiche. Il legante bituminoso permette, oltre che impermeabilizzare la miscela, di conferire alla stessa la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni indotte dal traffico veicolare (taglio, trazione, compressione e flessione).

Nella sperimentazione in questione, per la realizzazione delle miscele bituminose *dense-graded*, è stato utilizzato un bitume modificato con polimeri stirene-butadiene-stirene (SBS-polymer-modified bitumen) (Figura 2.7). Il bitume utilizzato, denominato 16PMB07, presenta le seguenti caratteristiche: penetrazione a 25 °C di 50 dmm (classe 4: 50-70), punto di rammollimento 74,2 °C (classe 4: 70-90), viscosità dinamica a 160 °C di 376 mPa*s (0,15-0,80), ritorno elastico a 25 °C del 97% (classe 2 \geq 80%). Tutti i parametri di caratterizzazione del legante sono stati definiti attraverso prove eseguite dal fornitore del legante stesso, in conformità alle normative vigenti.



Figura 2.7 bitume SBS-PMB

2.1.3 Additivi chimici

Gli additivi chimici, come ormai noto dalla letteratura scientifica, risultano essere particolarmente importanti nella tecnologia WMA per conferire adeguata lavorabilità alla miscela oltre che incrementare la percentuale di utilizzo di fresato (RA). All'interno dell'additivo chimico, inoltre, risultano essere presenti anche additivi rigeneranti che permettono di rigenerare il bitume invecchiato contenuto nel fresato. Nel mercato risultano essere presenti numerosi additivi chimici la cui composizione non risulta essere però nota poiché i produttori non forniscono la quantità esatta delle sostanze presenti al loro interno, ma solo un range di valori indicativi.

Nella sperimentazione in esame sono stati utilizzati sette differenti additivi chimici che denomineremo come A, B, C, D, E, F, G (Figura 2.8).

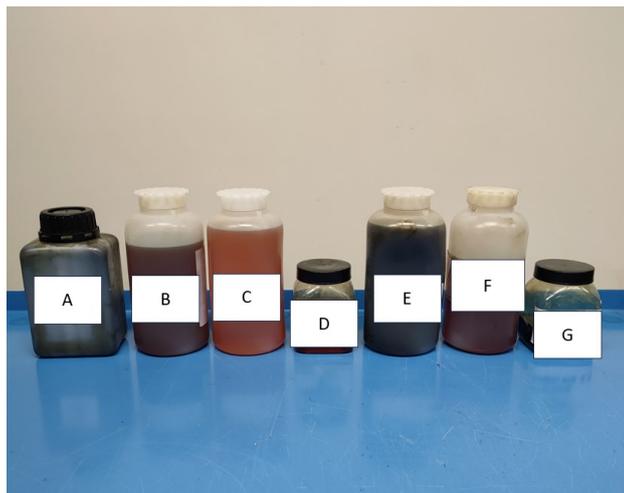


Figura 2.8 additivi chimici utilizzati

Per quanto riguarda il dosaggio, si è ritenuto opportuno posizionarsi al valore medio del range fornito dal produttore dell'additivo stesso. I dosaggi consigliati e quelli effettivamente utilizzati nel confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso sono riportati in tabella 2.1. L'additivo è stato aggiunto al bitume riscaldato prima dell'inserimento dello stesso nel miscelatore.

Additivo	dosaggio effettivo (in peso di bitume vergine)	dosaggio consigliato produttore
[-]	[%]	[%]
A	1,00	0,50 ÷ 1,50
B	0,35	0,20 ÷ 0,50
C	0,35	0,20 ÷ 0,51
D	0,35	0,20 ÷ 0,52
E	1,05	0,08 ÷ 0,13 *
F	1,75	0,05 ÷ 0,30 *
G	0,5	0,40 ÷ 0,60

* su peso di RA aggiunto

Tabella 2.1 dosaggio additivi chimici

2.2 Apparecchiature e metodologie di prova

Nel presente paragrafo vengono illustrate nel dettaglio tutte le apparecchiature ed i rispettivi protocolli di prova seguiti in laboratorio sia per le prove riguardanti i leganti che per le miscele di conglomerato bituminoso prodotto. Per completezza viene riportato, inoltre, il metodo di confezionamento dei provini e le procedure seguite. Al fine di agevolare la lettura, vengono trattate separatamente le due fasi (leganti e miscele) in cui è stata suddivisa la sperimentazione.

2.2.1 Fase 1: leganti

Nel presente paragrafo vengono descritte le apparecchiature e i protocolli di prova impiegati per l'analisi dei bitumi e per l'invecchiamento dello stesso.

2.2.1.1 Viscosimetro rotazionale Brookfield

La viscosità dinamica può essere valutata attraverso la misura della resistenza opposta da un fluido nei confronti di un corpo immerso al suo interno che viene sottoposto ad una rotazione a velocità costante attraverso un mandrino azionato da un motore. Partendo da tale definizione, una delle apparecchiature più diffuse per la misura della viscosità è rappresentata dal viscosimetro rotazionale Brookfield (Figura 2.9) la cui procedura di prova è standardizzata dalla normativa UNI EN 13302 [29]. Tale viscosimetro rotazionale permette di determinare le caratteristiche di viscosità di un bitume ad una determinata temperatura misurando il momento torcente richiesto per mantenere costante la velocità di una girante cilindrica (Figura 2.10) immersa nel legante.

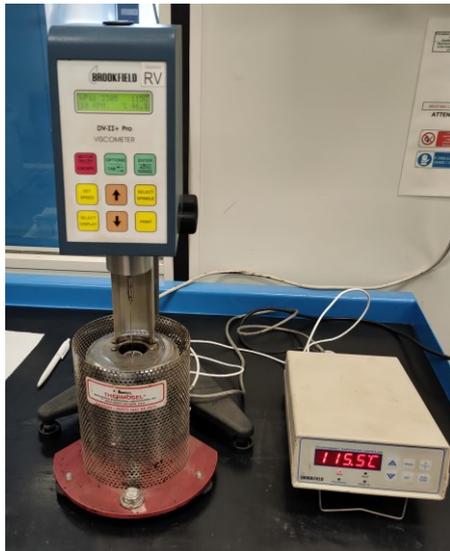


Figura 2.9 viscosimetro Brookfield



Figura 2.10 girante S21

Lo strumento si compone di un termocontainer collegato ad un termostato che permette l'alloggiamento del campione durante la prova, un termocontroller la cui funzione è quella di fornire calore al termocontainer (temperatura di prova tra 60÷200 °C), girante cilindrica (spindle) e centralina di controllo dotata di motore che permette alla girante di roteare alla velocità costante fissata dall'operatore. Nota la geometria della girante, del provino e la velocità angolare di prova, lo strumento restituisce direttamente i valori di *shear rate* $\dot{\gamma}$ (s^{-1}), *shear stress* τ (Pa) e *viscosità* η (Poise) calcolati secondo le seguenti formule:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \omega \cdot R_c^2 \cdot R_b^2}{x^2 \cdot (R_c^2 \cdot R_b^2)} \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot R_b^2 \cdot L} \quad (2.2)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Dove:

- ω è la velocità angolare della spindle (rad/sec);
- R_c è il raggio del contenitore (cm);
- R_b è il raggio della spindle (cm);
- x è il raggio in corrispondenza del quale viene misurato lo shear rate (cm);
- M è il torcente misurato dallo strumento (%);
- L è la lunghezza effettiva della spindle (cm).

La prova viene realizzata su un campione di bitume di peso pari a 10,5 grammi, preventivamente riscaldato per renderlo fluido e versato poi nell'apposita provetta metallica da inserire nel vano dello strumento. Si inserisce dunque la girante (spindle) all'interno del campione e, dopo un iniziale condizionamento del campione stesso per una durata di circa 15 minuti, si procede con la prova. Il condizionamento è necessario al fine di garantire il raggiungimento omogeneo della temperatura di prova a tutto il legante. L'operatore fissa, attraverso l'apposito menu, la velocità angolare della girante e, trascorsi circa 5 minuti dall'inizio della prova a quella velocità impostata, è possibile registrare la misura. Questa fase di attesa permette al bitume di raggiungere la condizione di regime restituendo così un valore stabile di viscosità. È possibile effettuare la prova a tutte le temperature garantendo sempre un adeguato tempo di condizionamento necessario a garantire il raggiungimento omogeneo della temperatura impostata al bitume.

Nella sperimentazione in questione è stata utilizzata una spindle da 21 e la prova è stata effettuata, per ogni campione di bitume additivato e no, alla temperatura di 115 °C, 135 °C, 160 °C e 180°C con valori di viscosità (η) misurati a shear rate prossimi al 25%, 50%, 70%. Questo permette di poter valutare l'evoluzione della viscosità in funzione della temperatura.

2.2.1.2 Binder Bond Strength (BBS) test

Il Binder Bond Strength (BBS) test viene eseguito mediante l'utilizzo di una apparecchiatura (Figura 2.11) la quale applica una forza di trazione crescente linearmente fino al raggiungimento della condizione di rottura (pull-off) su appositi pistoncini (pull-stub) incollati al substrato lapideo. Tale prova permette di stimare il legame bitume-aggregato e il corrispondente tipo di rottura (adesiva o coesiva) e, di conseguenza, permette di definire la compatibilità tra aggregato e legante. La normativa di riferimento è la AASHTO T 361-16 [30] che prevede la possibilità di effettuare la prova su differenti tipologie di aggregato (calcareo o basaltico) e con differenti condizionamenti del campione (condizionamento asciutto o condizionamento umido).



Figura 2.11 apparecchiatura per prova BBS

I provini vengono preparati ponendo una piccola quantità di legante (circa 0,08 grammi), appositamente preparato (Figura 2.12), sulla testa di pistoncini metallici (pull-stub) alloggiati in appositi supporti metallici (Figura 2.13) per essere poi riscaldati in forno per circa 15 minuti a temperatura fissata dall'utente. La fase di riscaldamento permette al legante di ridurre la sua consistenza in modo tale che possa distribuirsi su tutta la superficie del supporto usato. Al termine dei 15 minuti si preleva il pull-stub dal forno e lo si applica immediatamente sulla superficie da testare (anch'essa preventivamente riscaldata in forno) esercitando manualmente su di esso una leggera pressione tale da garantire un livello di adesione ottimale (Figura 2.14). Per ogni disco di aggregato vengono incollati quattro pull-

stub. La temperatura di riscaldamento del legante e delle superfici di prova è fissata pari a quella di confezionamento della miscela bituminosa per avere valori attendibili e confrontabili con la condizione reale di adesione bitume-aggregato.



Figura 2.12 palline di bitume



Figura 2.13 supporto metallico



Figura 2.14 campione confezionato

A seguito dell'incollaggio, i campioni così realizzati, sono sottoposti a raffreddamento a temperatura ambiente per due ore per essere poi soggetti a condizionamento. Il condizionamento a cui il campione è stato soggetto è di tipo umido (*wet*) e permette di valutare i danni causati al campione per effetto dell'umidità. Tale condizionamento consiste nel sottoporre il campione per 24 ore a bagno termostatico a 40 °C (Figura 2.15) più 2 ore in camera climatica a 25 °C (Figura 2.16). La temperatura di condizionamento e la durata dello stesso sono fissati da normativa e dipende dalla tipologia di prova da effettuare. Nella fase di posizionamento dei campioni è bene verificare che la quantità di acqua sia sufficiente a garantire il completo ricoprimento degli stessi. Il bagno termostatico, inoltre, è dotato di una pompa di ricircolo che permette di garantire una temperatura omogenea dell'acqua.



Figura 2.15 bagno termostatico

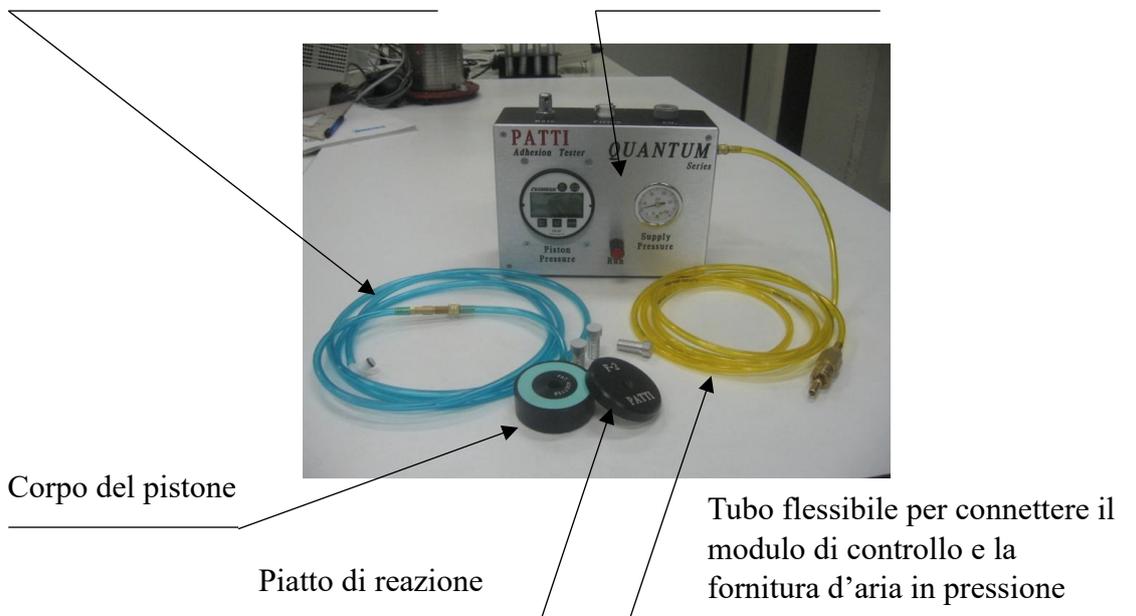


Figura 2.16 camera climatica

Terminata la fase di condizionamento e quindi tutte le attività preliminari di preparazione del provino, si procede con la prova BBS. Tale prova consiste nell'applicazione, lungo l'asse del pull-stub, di una forza di trazione che misura quantitativamente il vincolo esistente tra la pellicola di legante e la superficie sottostante. L'apparecchiatura, denominata PATTI, si compone di un modulo di controllo (Figura 2.17) alimentato a pressione attraverso un tubo flessibile connesso alla relativa valvola di entrata dell'aria (massimo 200 psi), ed è collegato, attraverso un secondo tubo flessibile, ad un pistone formato da un corpo e da un piatto di reazione che opera il collegamento tra il pistone stesso ed il pull-stub.

Tubo flessibile per connettere il pistone e modulo di controllo

Modulo di controllo



Corpo del pistone

Piatto di reazione

Tubo flessibile per connettere il modulo di controllo e la fornitura d'aria in pressione

Figura 2.17 apparecchiatura per prove di Binder Bond Strength (BBS)

Durante la prova l'apparecchiatura incrementa lentamente e linearmente la pressione esercitata sul pistone attraverso il piatto di reazione fino alla separazione del sistema pull-stub/legante dalla superficie dell'aggregato. Al termine della prova, il modulo di controllo registra la massima pressione applicata al pistone che ha generato il distacco. Tale pressione viene denominata pressione di "strappo" (BP = "Burst Pressure"). Per ricavare la tensione di distacco per trazione (POTS = Pull-Off Tensile Strength), che è il parametro che descrive l'adesione bitume-aggregato, è sufficiente rapportare la pressione di "strappo" all'area di contatto del pull-stub con la superficie di prova mediante la seguente relazione:

$$POTS = \frac{(BP \cdot A_g) - C}{A_{ps}} \quad (2.4)$$

Dove:

- POTS è la tensione di distacco per trazione (psi);
- BP è la pressione di stappo (psi);
- A_g è l'area di contatto tra guarnizione e piatto di reazione;
- C è una costante (dipende dal tipo di pistone usato);
- A_{ps} è l'area del pull-stub.

Per passare poi dal valore di POTS in psi a quello in kPa si moltiplica per il fattore di conversione:

$$POTS [kPa] = POTS [psi] \cdot 6.8947573 \quad (2.5)$$

La prova prevede, inoltre, che venga condotta un'analisi di tipo visivo della superficie di rottura in modo da stabilire se questa è di tipo coesivo, adesivo o intermedia. In particolare, abbiamo:

- Coesivo: rottura all'interno dello spessore di bitume. L'adesione legante-aggregato è superiore alla coesione interna del bitume. La superficie del piatto di aggregato risulta essere principalmente ricoperta dal bitume (Figura 2.18);
- Adesivo: il legante si stacca quasi completamente dall'aggregato, ovvero la crisi avviene all'interfaccia bitume-aggregato. La coesione interna del bitume è superiore rispetto all'adesione aggregato/bitume. La superficie del piatto di aggregato resta totalmente scoperta; il bitume rimane principalmente sulla testa del pistoncino (Figura 2.19);
- Coesivo-adesivo: ibrida tra le due (Figura 2.20).



Figura 2.18 rottura coesiva



Figura 2.19 rottura adesiva



Figura 2.20 rottura ibrida

Nella sperimentazione in questione è stato utilizzato un aggregato basaltico (condizione più critica rispetto ad aggregato calcareo) con condizionamento del campione ad umido (wet). L'aggregato, prima dell'incollaggio, è stato riscaldato in forno per 2 ore alla temperatura di 130 °C.

2.2.1.3 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)

La procedura Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), standardizzata dalla normativa UNI EN 12607-1 [31], permette di simulare e riprodurre in laboratorio l'invecchiamento a breve

termine che il bitume subisce durante le fasi di miscelazione, trasporto e posa in opera del conglomerato bituminoso. L'apparecchiatura utilizzata (Figura 2.21) si compone di un forno dotato di regolazione termostatica che garantisce il mantenimento della temperatura al suo interno di 163 °C, di un sistema rotante motorizzato costituito da 3 piatti circolari metallici con fori per il posizionamento dei contenitori di vetro (Figura 2.22) in posizione orizzontale e di un ugello posizionato in modo tale da insufflare, con portata nota, aria calda in ciascun contenitore nel momento in cui si trova in sua corrispondenza. La rotazione del sistema, oltre a permettere al bitume contenuto di spandersi assumendo lo spessore di un film sottile garantendo la riproduzione dello strato reale di bitume che avvolge gli aggregati lapidei nelle miscele di conglomerato, garantisce l'ossidazione e l'invecchiamento del bitume.



Figura 2.21 RTFOT



Figura 2.22 contenitore di vetro

Il bitume, prima di essere versato all'interno dei contenitori, deve essere riscaldato per rendere il campione completamente fluido. Dopo essere stato mescolato e reso omogeneo, il bitume fluido viene versato nei contenitori puliti e tarati con apposita bilancia digitale, fino a garantire un quantitativo pari a 35 grammi cadauno. Quando il forno ha raggiunto la temperatura stabilita per la prova, si provvede ad alloggiare i contenitori con il legante bituminoso nel sistema rotante, chiudere lo sportello, avviare il flusso di aria con una portata di 4 dm³/min e azionare la rotazione del sistema alla velocità di 15 giri/minuto dando così il via alla prova. La prova prevede una durata di 75 minuti, misurati a partire dal momento in cui la temperatura raggiunge il valore di riferimento pari a 163 °C.

2.2.1.4 Pressure Ageing Vessel (PAV)

La procedura Pressure Ageing Vessel (PAV) permette di simulare e riprodurre in laboratorio, in condizioni accelerate, l'invecchiamento a lungo termine a cui è sottoposto il bitume durante la vita utile di servizio della pavimentazione. La prova è standardizzata attraverso la normativa UNI EN 14769 [32]. L'apparecchiatura (Figura 2.23) si compone di un recipiente pressurizzato all'interno del quale viene inserito un castelletto metallico (Figura 2.24) che permette di adagiare, su più livelli, degli appositi dischi metallici (Figura 2.25) che, prima della prova, vengono riempiti con bitume. Ogni disco, appositamente tarato con bilancia digitale, viene riempito con 50 grammi di bitume. La normativa richiede che il bitume utilizzato sia già stato condizionato attraverso un invecchiamento a breve termine (RTFOT) per simulare al meglio le condizioni reali. La prova, dunque, viene realizzata sempre a valle di un iniziale invecchiamento a breve termine e, per evitare di riscaldare nuovamente il bitume e dunque di invecchiarlo ulteriormente, i dischi metallici vengono riempiti durante lo svuotamento dei contenitori utilizzati per la prova RTFOT. La pressione nel recipiente è garantita dalla presenza di un'apposita bombola collegata attraverso un tubo che permette di raggiungere la pressione di prova di 2.1 Mpa.



Figura 2.23 Pressure Ageing Vessel (PAV)



Figura 2.24 castelletto metallico



Figura 2.25 disco metallico

La normativa prescrive, inoltre, la pressione della camera, la temperatura e la durata della prova. In riferimento alla pressione interna alla camera, essa deve essere mantenuta costante durante tutto l'arco della prova ad un valore di 2.1 MPa. L'aria pressurizzata viene aspirata dallo strumento, attraverso un apposito tubo, da una bombola posta in sua vicinanza. La prova avviene a una temperatura di 100 °C (anch'essa da mantenere costante) ed ha durata di 20 ore. Una volta conclusa la prova, lo strumento depressurizza automaticamente la camera ed è possibile procedere, seguendo un'apposita sequenza, all'estrazione del bitume invecchiato. Per prima cosa, la procedura prevede la chiusura della bombola contenente aria pressurizzata per procedere poi svitando le sei viti che garantiscono la chiusura del portellone della camera pressurizzata. Si estrae, dunque, il castelletto attraverso l'uso di un apposito gancio e si procede svuotando in sequenza i dischi metallici. Durante la fase di svuotamento, per rimuovere le bolle d'aria che si formano nel bitume (Figura 2.26), si agisce, attraverso una bacchetta di vetro (Figura 2.27), mescolando bene il legante per versarlo poi in contenitori di alluminio.



Figura 2.26 bitume post PAV



Figura 2.27 bacchetta di vetro

Nella sperimentazione in questione, il bitume già invecchiato a breve termine è stato soggetto a due cicli consecutivi di invecchiamento a lungo termine accelerato tramite PAV secondo le modalità fissate in normativa.

2.2.2 Fase 2: miscele

Nel presente paragrafo vengono descritte le apparecchiature utilizzate per il confezionamento delle miscele e per la preparazione dei provini. Si riportano e descrivono, inoltre, tutte le apparecchiature e i protocolli di prova impiegati per lo svolgimento del programma sperimentale.

2.2.2.1 Confezionamento delle miscele

Per il confezionamento di tutte le miscele di conglomerato bituminoso oggetto della sperimentazione, si è proceduto utilizzando lo stesso processo in laboratorio e lo stesso mix-design (Tabella 2.2).

Materiali impiegati		
	[g]	[%]
Calcere 20/32	1960	14
Calcere 10/20	3920	28
Calcere 0/4	3640	26
Filler calcareo 0/1	280	2
RA 0/14	4200	30
Tot. Aggregati	14000	100
Bit. vergine [agg]	420,0	3,00
Bit. Tot. [agg]		4,30

Tabella 2.2 mix-design

Per prima cosa, nel confezionamento delle miscele, si è proceduto andando a preparare opportunamente il materiale lapideo attraverso pesatura con apposita bilancia digitale delle differenti frazioni granulometriche indicate nel mix-design (Figura 2.28).



Figura 2.28 pesa aggregato

A seguito della pesatura, gli aggregati (eccetto RA) vengono sottoposti alla fase di riscaldamento onde evitare lo shock termico al bitume una volta entrati in contatto nella miscela. Il riscaldamento degli aggregati avviene per mezzo di un forno (Figura 2.29). Anche il bitume necessita di riscaldamento per poter essere utilizzato nella miscela. Anche in questo caso il riscaldamento è garantito dall'utilizzo di un apposito forno. Una volta conclusa la fase di riscaldamento delle varie componenti si procede con la miscelazione. Durante questa fase i materiali vengono inseriti seguendo un preciso ordine al fine di ottenere un impasto omogeneo. Nel miscelatore (Figura 2.30), opportunamente programmato regolando la temperatura di miscelazione e la durata delle fasi di miscelazione, vengono inseriti prima gli aggregati (vergini e fresato) e quindi miscelati per 30 secondi, viene dosato poi il bitume vergine (non additivato per le miscele di riferimento e additivato per le altre) e si procede dunque con una nuova miscelazione di durata 120 secondi e, infine, si inserisce il filler calcareo procedendo così con l'ultima miscelazione di 180 secondi.



Figura 2.29 forno



Figura 2.30 miscelatore

Si riporta, inoltre, attraverso la Tabella 2.3, le temperature adottate nelle varie fasi per la produzione dei provini di conglomerato bituminoso.

	materiale	riscaldamento		miscelazione	compattazione
		temperatura [°C]	durata [h]	temperatura [°C]	temperatura [°C]
miscela tradizionale a caldo	aggregato	180	3	170	160
	bitume	170	2		
miscela tiepida (WMA)	aggregato	140	3	130	120
	bitume	170	2		

Tabella 2.3 temperature e durata fasi

A miscelazione ultimata (Figura 2.31) si procede, attraverso utilizzo di apposite ciotole e sessole, a suddividere il conglomerato bituminoso ottenuto in tre porzioni di quantità nota (4500 g) (Figura 2.32). La fase di porzionamento deve avvenire il più velocemente possibile al fine di evitare un eccessivo raffreddamento della miscela. Una volta riempita la prima ciotola, la si inserisce immediatamente nel forno e si procedendo poi con la successiva. L'inserimento della miscela in forno alla temperatura di compattazione per una durata di almeno un'ora, permette di simulare quella che è la fase di trasporto del conglomerato stesso dall'impianto di produzione alla zona di stesa garantendo una maggiore correlazione tra laboratorio e realtà. In questa fase, infatti, il conglomerato subisce, per via delle alte temperature, un ulteriore invecchiamento che non può essere trascurato.



Figura 2.31 miscela di conglomerato bituminoso



Figura 2.32 porzionamento miscela

2.2.2.2 Compattazione con pressa giratoria

Dopo il riscaldamento del materiale porzionato per almeno un'ora alla temperatura di compattazione (160 °C per miscela calda e 120 °C per miscele tiepide), si procede con la preparazione dei provini. L'ordine di confezionamento segue quello di collocamento all'interno del forno in modo tale da garantire, per quanto possibile, lo stesso tempo di stazionamento del conglomerato in forno e, di conseguenza, lo stesso invecchiamento del bitume. La compattazione è stata eseguita attraverso pressa giratoria (Figura 2.33) per provini da 150 mm di diametro. La pressa giratoria è un macchinario comunemente utilizzato per la compattazione di provini in laboratorio (Figura 2.34).



Figura 2.33 pressa giratoria



Figura 2.34 provino da pressa giratoria

Il macchinario si compone di un telaio di carico con un pistone grazie al quale viene applicata una pressione costante al materiale e, nella parte inferiore, da una base rotante che permette la rotazione della fustella (velocità di rotazione 30 giri/minuto). La compattazione è ottenuta mediante l'azione simultanea di una compressione statica di 600 kPa e l'azione di taglio risultante dal movimento dell'asse del campione che genera una superficie conica di rivoluzione (Figura 2.35) che permette la continua riorganizzazione dei granuli della miscela. La combinazione di azioni permette di simulare al meglio la compattazione che il conglomerato bituminoso subisce in sito per azione dei rulli.

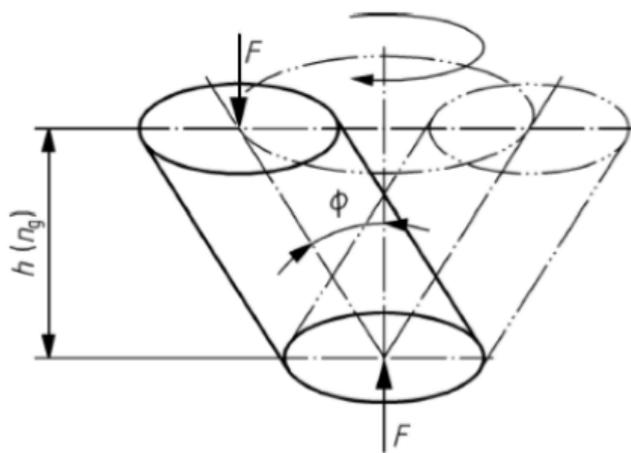


Figura 2.35 simulazione movimento pressa giratoria

È possibile impostare il funzionamento della pressa giratoria in due modalità:

- ad altezza impostata, quindi preparando un provino di geometria nota;
- a giri impostati, applicando quindi una certa energia che simula al meglio le azioni in sito così da ricavare poi le dimensioni del provino.

Per la sperimentazione in oggetto è stata utilizzata la modalità a giri impostati con il valore di giri N_{design} pari a 120.

La normativa di riferimento relativa alla preparazione di provini con la pressa giratoria è la UNI-EN 12697-31 [33]. Tale normativa descrive, prima di tutto, quella che è la fase di preparazione definendo la massa della miscela da introdurre nello stampo. Nel caso di miscela asciutta avremo:

$$M = 10^{-3} \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h_{\min} \cdot \rho_m \quad (2.6)$$

Dove:

- M è la massa di una miscela asciutta da introdurre nello stampo, in grammi (g);
- D è il diametro interno dello stampo, in millimetri (mm);
- h_{\min} è l'altezza minima del provino compattato, corrispondente allo zero per cento di vuoti, in millimetri (mm);
- ρ_{\min} è la massa volumica massima della miscela, in megagrammi per metro cubo (Mg/m^3).

La normativa richiede, inoltre, che le fustelle e gli inserti siano riscaldati in forno a temperatura di compattazione per almeno due ore onde evitare lo shock termico della miscela una volta a contatto con la fustella stessa. Tutto il processo di preparazione e inserimento del conglomerato nella fustella deve avvenire il più velocemente possibile per garantire il mantenimento della giusta temperatura di compattazione. Il procedimento per la realizzazione dei provini è il seguente: si isola la superficie inferiore con un apposito disco di carta, si inserisce dunque il conglomerato bituminoso contenuto nella singola ciotola per isolare poi, attraverso un ulteriore disco di carta, la superficie superiore. Si procede adagiando superiormente un disco metallico che svolge la funzione di interfaccia tra conglomerato e pistone di carico. Conclusa la fase di preparazione, si procede inserendo la fustella all'interno del macchinario iniziando così la compattazione del provino. A fine

compattazione il provino così realizzato viene estruso attraverso un apposito pistone e identificato con il corrispettivo codice (Figura 2.36).



Figura 2.36 codice identificativo provino

2.2.2.3 Determinazione delle proprietà volumetriche

Le proprietà volumetriche delle miscele bituminose studiate sono state determinate secondo quanto prescritto e indicato dalla normativa UNI EN 12697-8 [34]. È possibile, dunque, definire il contenuto di vuoti d'aria nel provino attraverso la seguente formula:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \quad (2.7)$$

Dove:

- V_a è il di vuoti d'aria del provino bituminoso (%);
- ρ_m è la massa volumica massima della miscela (Mg/m^3);
- ρ_b è la massa volumica apparente totale della miscela (Mg/m^3).

Per il calcolo della massa volumica massima della miscela (ρ_m) è stato utilizzato il metodo matematico (procedura C) previsto dalla normativa UNI EN 12697-5 [35] che richiede la conoscenza della composizione della miscela (percentuale di aggregato e percentuale di legante) e la massa volumica degli aggregati e del legante. Per la massa volumica apparente

totale (ρ_b), in accordo alla normativa UNI EN 12697-6 [36], si è utilizzato il metodo dry (Figura 2.37 e Figura 2.38) secondo la seguente formula:

$$\rho_{dry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \rho_w \quad (2.8)$$

Dove:

- m_1 è la massa del provino asciutto (g);
- m_2 è la massa del provino in acqua (g);
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (kg/m^3).



Figura 2.37 pesa campione asciutto



Figura 2.38 pesa idrostatica del campione

Nella presente sperimentazione, essendo noto il grado di compattazione finale C (Cfr. 2.2.2.4) è possibile ricavare i vuoti d'aria (o vuoti residui V_m) attraverso la seguente formula:

$$V_m = 100 - C \quad (2.9)$$

2.2.2.4 Studio della lavorabilità

Lo studio della lavorabilità si basa sulla determinazione del *Compaction Energy Index* (CEI) il quale rappresenta l'energia trasferita in sito dai rulli per compattare la miscela alla densità richiesta prima dell'apertura al traffico. Per il calcolo dell'indice CEI viene determinata

l'area sottesa alla curva di compattazione (Figura 2.39) a partire dall'ottava rotazione fino al raggiungimento del 92% di C (grado di compattazione) per le miscele chiuse. Tale limite rappresenta la densità massima raggiunta al conglomerato al termine della costruzione della pavimentazione prima che venga riaperta al traffico veicolare e subisca un'ulteriore compattazione dovuta a tali carichi. Una miscela risulta essere tanto più compattabile quanto minore è il valore del parametro CEI in quanto richiede minor sforzo per la compattazione, ma sono da evitare valori eccessivamente bassi perché potrebbe indicare una miscela eccessivamente "soffice".

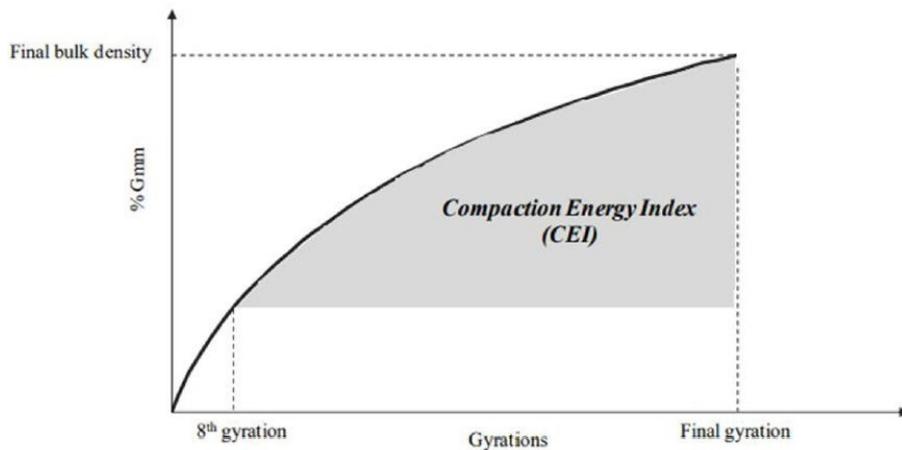


Figura 2.39 definizione indice CEI

La curva di compattazione è ottenibile elaborando i dati che vengono continuamente registrati in fase di compattazione dalla pressa giratoria riportando in ascissa il numero di giri effettuati e in ordinata il corrispondente grado di compattazione C determinato attraverso la seguente formula:

$$C = 100 - V_m = 100 - \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} = \frac{\rho_b}{\rho_m} \cdot 100 \quad (2.10)$$

Dove:

- C è il grado di compattazione (%);
- V_m è il contenuto di vuoti residuo (%);
- ρ_m è la massa volumica massima della miscela (kg/m^3);
- ρ_b è la massa volumica apparente totale della miscela (kg/m^3).

Per la costruzione della curva risulta dunque necessario conoscere la massa volumica massima della miscela (ρ_m), determinata come precedentemente esposto, e la massa volumica apparente totale della miscela (ρ_b) per ogni giro eseguito dalla pressa (Cfr. 2.2.2.3). Poiché non risulta essere possibile misurare per ogni giro la massa volumica apparente della miscela, si procede a ricavare il valore C_i al giro i -esimo, utilizzando il valore della massa volumica apparente della miscela (ρ_b), misurata come precedentemente descritto, al termine della compattazione sul provino avente altezza finale pari a h_{fin} , rapportandola all'altezza h_i del provino al giro i -esimo misurato dalla pressa. L'espressione usata è la seguente:

$$C_i = \frac{\rho_b}{\rho_m} \cdot \frac{h_{fin}}{h_i} \cdot 100 \quad (2.11)$$

2.2.2.5 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM)

La prova di modulo a trazione indiretta (*Indirect Tensile Stiffness Modulus* – ITSM) permette di determinare il modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta di provini in conglomerato bituminoso attraverso l'utilizzo di un'apparecchiatura denominata *Nottingham Asphalt Tester* (NAT) (Figura 2.40). Per la prova sono stati utilizzati dei provini cilindrici (Figura 2.41), appositamente ricavati dal provino compattato con pressa giratoria attraverso l'uso di una sega circolare. Sugli stessi provini si è proceduto poi, attraverso una nuova analisi delle proprietà volumetriche eseguite come precedentemente descritto (Cfr. 2.2.2.3), alla determinazione dei vuoti. La normativa di riferimento è la UNI EN 12687-26 (Annesso C) [37].



Figura 2.40 Nottingham Asphalt Tester

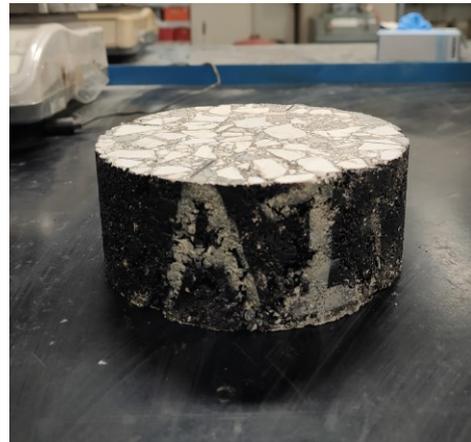


Figura 2.41 provino cilindrico per prova

L'apparecchiatura si compone di una camera climatica che permette di assicurare la temperatura prestabilita dalla prova, di un telaio di carico, di un'unità pneumatica e un sistema computerizzato di controllo ed acquisizione dati. Il telaio di carico (Figura 2.42) è costituito da due montanti, una trave di contrasto regolabile, una base esagonale per l'alloggiamento del castelletto contenente il provino e da un attuatore pneumatico collegato ad un pistone che ne consente l'applicazione del carico. Il castelletto (Figura 2.43) utilizzato per alloggiare il provino si compone di due montanti, una base rettangolare, una struttura rettangolare in sommità per la distribuzione uniforme del carico e telaio porta-trasduttori dotato di un sistema di viti per il posizionamento e bloccaggio del provino.

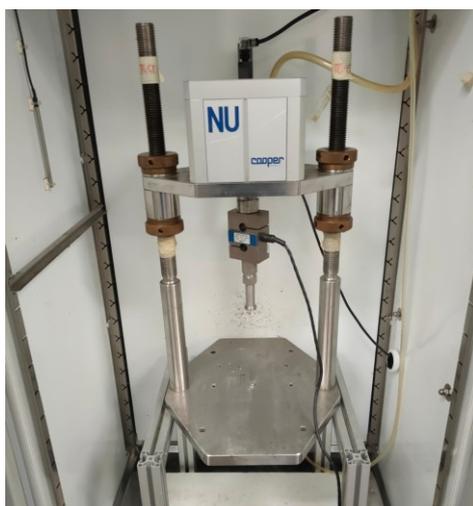


Figura 2.42 telaio di carico

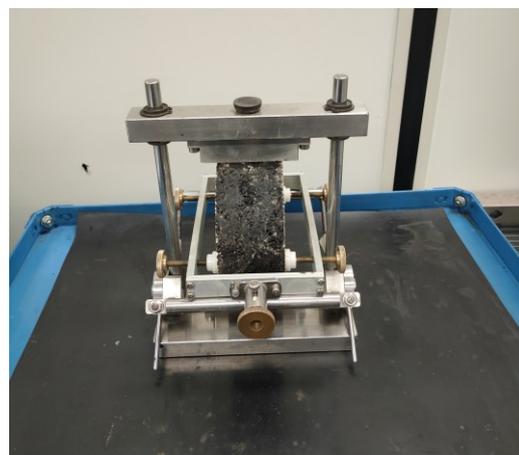


Figura 2.43 telaio alloggiamento provino

La prova può essere effettuata in due modalità: a deformazione controllata o a tensione controllata. Nella sperimentazione in questione la prova è stata effettuata a deformazione controllata (7,5 µm). Tale prova consiste nell'applicazione dinamica di un carico lungo il diametro verticale del provino cilindrico e nella misurazione, attraverso appositi trasduttori posizionati a contatto con il provino, della deformazione lungo il piano diametralmente ortogonale. Il carico applicato è di tipo sinusoidale impulsivo in modo da simulare al meglio l'effetto prodotto nelle pavimentazioni dal passaggio di un veicolo. Attraverso il software che gestisce l'apparecchiatura è possibile impostare i parametri della prova ovvero temperatura (20 °C), diametro e altezza del provino, coefficiente di Poisson (posto pari a 0,35) e il tempo di picco (rise time) che rappresenta il tempo impiegato da un impulso a raggiungere il valore di picco (124 ms) (Figura 2.44).

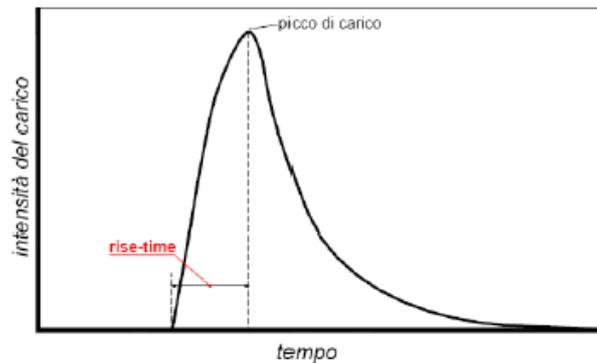


Figura 2.44 forma d'onda per la prova di modulo a trazione indiretta

Terminate tutte le attività preliminari di preparazione è possibile avviare la prova. Il macchinario applica inizialmente 10 impulsi di condizionamento per poi iniziare effettivamente con la prova. Durante tale esecuzione il provino è sottoposto a 5 impulsi di carico e il software in automatico registra il tempo di picco e la deformazione orizzontale e restituisce due moduli elastici: uno basato sulla curva reale dell'impulso di carico calcolato secondo la formula 2.12 e un valore di modulo elastico corretto tramite un fattore AF (Adjustment Factor) che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata e ricavato usando la formula 2.13.

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,273 + \nu) \quad (2.12)$$

$$E_{cor} = E \cdot [1 - 0,322(\log(E) - 1,82) \cdot (0,60 - k)] \quad (2.13)$$

Dove:

- E è il modulo elastico del materiale (MPa);
- E_{cor} è il modulo elastico corretto del materiale (MPa);
- P è il carico applicato (kN);
- Δ è l'allungamento orizzontale del provino (mm);
- t è lo spessore del provino (mm);
- ν è il coefficiente di Poisson;
- k è il rapporto tra le aree.

Il software riporta, poi, la media dei moduli elastici dei cinque impulsi. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino in modo da misurare il modulo anche nell'altra direzione. Infine, si definisce il modulo elastico del provino come la media delle medie dei moduli nelle due direzioni misurate.

2.2.2.6 Prova di trazione indiretta (ITT)

La prova di trazione indiretta (*Indirect Tensile Test* - ITT), nota anche come *prova Brasiliana*, permette di determinare in maniera indiretta la resistenza a trazione del provino di conglomerato bituminoso. Tale parametro è rappresentativo della capacità del materiale di trasmettere i carichi veicolari, i quali sono soggetti a flessione e, di conseguenza, all'innescò di microfessurazione diffusa che può evolvere nel tempo fino a raggiungere gli strati superficiali creando percorsi preferenziali di infiltrazione delle acque meteoriche e favorendo così una maggiore suscettibilità al degrado. La prova è standardizzata dalla UNI EN 12697-23 [38] e viene svolta su provini cilindrici. L'apparecchiatura di prova (Figura 2.45) è una pressa statica composta da un telaio di carico formato da due piatti paralleli orizzontali. Il piatto inferiore è fissato ad una base agganciata a due guide che consentono lo spostamento verticale delle due teste di carico fino a che il piatto superiore non arriva a contatto con il provino e ne inizi la compressione con velocità di deformazione costante pari a 50 mm/min. La prova consiste, dunque, nell'applicare un carico di compressione lungo il

piano diametralmente verticale e la rottura avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico per effetto Poisson (Figura 2.46).

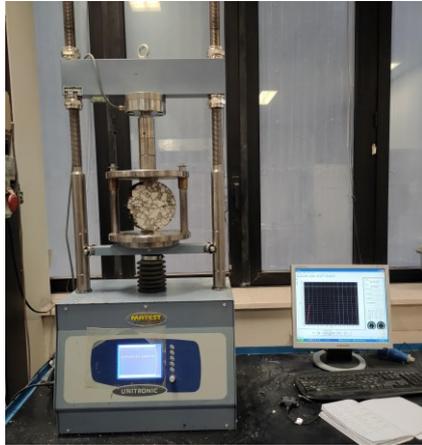


Figura 2.45 apparecchiature per prova ITT

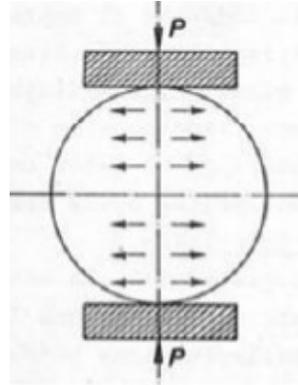


Figura 2.46 andamento tensioni

I provini testati devono essere soggetti a condizionamento in camera climatica alla temperatura di 25 °C per almeno 2 ore e la prova deve essere svolta il più velocemente possibile per evitare un'eccessiva variazione di temperatura nel provino. Il macchinario registra e fornisce il carico di picco che ha portato a rottura il provino dal quale è possibile risalire, attraverso la formula 2.14 e 2.15, al valore dell'indice ITS (*Indirect Tensile Stiffness*) e ITC (*Indirect Tensile Coefficient*).

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H} \cdot 100 \quad (2.14)$$

$$ITC = \frac{\pi \cdot ITS \cdot D}{2 \cdot \delta_c} \cdot 100 \quad (2.15)$$

Dove:

- ITS è la resistenza a trazione indiretta (kPa);
- ITC è il coefficiente di trazione indiretta:
- P è il carico di picco (N);
- D è il diametro del provino (mm);
- H è l'altezza del provino (mm);
- δ_c è la deformazione verticale a rottura del provino (mm).

Capitolo 3: Programma sperimentale

Nel seguente paragrafo si riporta il programma sperimentale definendo e quantificando le prove effettuate. La sperimentazione si è suddivisa in due fasi: analisi e prove sul bitume (fase leganti) e prove meccaniche sui provini confezionati di conglomerato bituminoso (fase miscele). Analizzando separatamente le due fasi abbiamo:

3.1 Fase 1: leganti

Nella prima fase si sono svolte prove sul bitume tal quale (SBS-PMB) e additivato con i sette differenti additivi chimici. Si è inoltre sottoposto il bitume vergine a invecchiamento a breve e lungo termine (RTFOT+2xPAV) per essere poi testato tal quale o additivato, valutando così la capacità di ringiovanente e rigenerante degli additivi. Sono state effettuate:

- Prove di viscosità attraverso viscosimetro rotazionale Brookfield su bitume vergine tal quale e additivato con i 7 additivi chimici. Le temperature di prova adottate sono 115 °C, 135 °C, 160 °C, 180 °C. Sono state svolte due ripetizioni per ogni soluzione adottata;
- Prove di Binder Bond Strength (BBS) effettuata sia su bitume vergine tal quale e additivato con i 7 additivi chimici sia su bitume vergine invecchiato (RTFOT + 2xPAV) tal quale e additivato. L'aggregato utilizzato è di tipo basaltico con condizionamento del campione umido (condizioni di prova più severe). Per ogni campione sono state effettuate due ripetizioni.

Le prove effettuate e il numero di ripetizioni delle stesse sono riassunte schematicamente in Tabella 3.1

Tipologia di prova eseguita e numero ripetizioni			
Viscosità dinamica (UNI EN 13302)		Binder Bond Strength Test (BBS) (AASHTO T 361-16)	
T=115 - 180°C		aggr. basaltico e cond. umido	
Campione		no invecchiamento	RTFOT + 2xPAV
SBS-PMB	2	2	2
SBS-PMB + A	2	2	2
SBS-PMB + B	2	2	2
SBS-PMB + C	2	2	2
SBS-PMB + D	2	2	2
SBS-PMB + E	2	2	2
SBS-PMB + F	2	2	2
SBS-PMB + G	2	2	2

Tabella 3.1 riassunto prove e ripetizioni effettuate su bitume

3.2 Fase 2: miscele

Nella presente sperimentazione, si sono confezionate, attraverso l'uso della pressa a taglio giratoria, nove differenti miscele, la prima, di riferimento, è stata confezionata secondo le tradizionali tecniche a caldo (denominata DG30H), la seconda, anch'essa di riferimento, è stata confezionata secondo la tecnologia WMA e priva di additivi (DG30W) mentre le successive sette hanno previsto l'utilizzo di additivo (DG30W_i con i=A, B, C, D, E, F, G). Per ogni miscela sono stati realizzati tre provini al fine di garantire una maggiore rappresentatività dei risultati finali. Si è proceduto poi con lo svolgimento delle seguenti prove:

- Determinazione delle proprietà volumetriche;
- Calcolo indice CEI;
- Prove di modulo (ITSM);
- Prove di trazione indiretta (ITT).

Le prove effettuate e il numero di ripetizioni delle stesse sono riassunte schematicamente in Tabella 3.2

Miscela	Tipologia di prova eseguita e numero ripetizioni				
	Compattazione pressa giratoria (UNI EN 12697-31)	proprietà volumetriche (UNI EN 12697-8)	CEI	ITSM (UNI EN 12697-26)	ITT (UNI EN 12697-23)
DG30H	3	3	3	3	3
DG30W	3	3	3	3	3
DG30W_A	3	3	3	3	3
DG30W_B	3	3	3	3	3
DG30W_C	3	3	3	3	3
DG30W_D	3	3	3	3	3
DG30W_E	3	3	3	3	3
DG30W_F	3	3	3	3	3
DG30W_G	3	3	3	3	3

Tabella 3.2 riassunto prove e ripetizioni effettuate sulle miscele bituminose

Capitolo 4: Analisi dei risultati

Nel presente capitolo verranno illustrati ed analizzati gli esiti delle prove precedentemente descritte e svolte durante la sperimentazione. Per facilitarne l'analisi e la lettura, si procede dividendo i risultati delle due fasi della sperimentazione (fase leganti e fase miscele). Per ogni prova effettuata si esporranno prima i risultati relativi al singolo campione analizzato e poi il confronto globale tra i valori medi ottenuti.

4.1 Fase 1: leganti

Nella prima fase della sperimentazione, si è proceduto indagando le capacità di modifica degli additivi chimici, opportunamente dosati (Cfr. 2.1.3), sulle caratteristiche del bitume. Si procede di seguito nell'esposizione dei risultati suddivisi per le differenti prove.

4.1.1 Viscosità

Vengono riportano di seguito i risultati della prova di viscosità eseguita attraverso viscosimetro rotazionale Brookfield su campioni di bitume vergine non additivato (Plain Bitumen *PB*) e additivato poi con i sette differenti additivi chimici (WC_i con $i = A, B, C, D, E, F, G$). La prova è stata svolta in conformità con quanto previsto da normativa UNI EN 13302 [29] e come precedentemente descritto (Cfr. 2.2.1.1). Per ogni campione analizzato si riportano due grafici: il primo correla la temperatura di prova (T) alla viscosità (η) (ad esempio, Figura 4.1) mentre, il secondo, correla la temperatura di prova (T) al logaritmo della viscosità ($\log\eta$) (ad esempio, Figura 4.2). Si riporta, infine, il confronto globale tra i campioni analizzati dai quali si trarranno le conclusioni finali.

PB (Plain Bitumen)

Dall'analisi dei risultati sotto riportati (Figura 4.1 e Figura 4.2) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità con valori delle due ripetizioni pressoché uguali per temperature di prova superiore ai 135 °C.

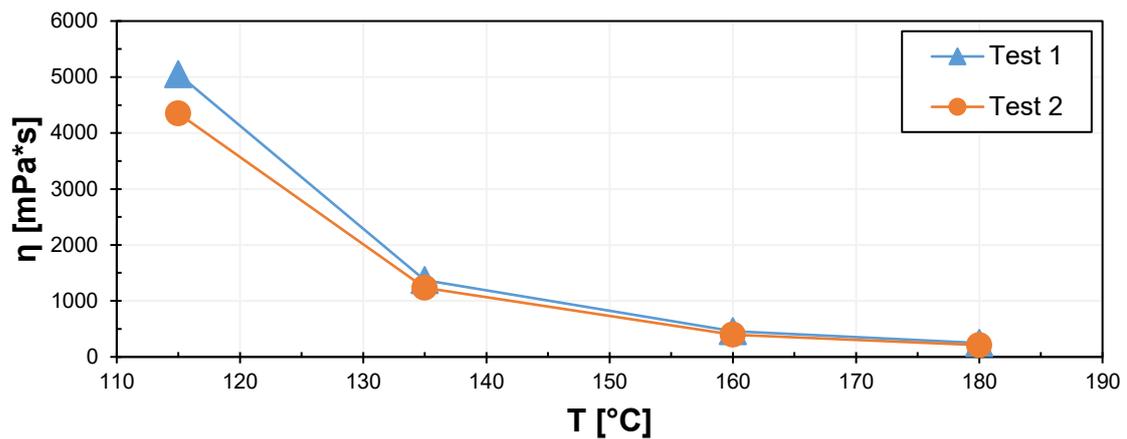


Figura 4.1 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni "PB"

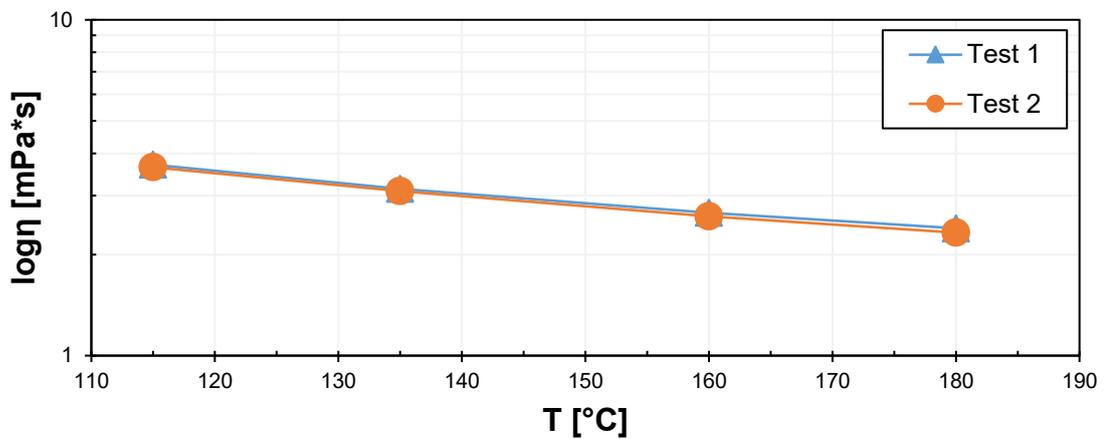


Figura 4.2 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni "PB"

WC_A

Da Figura 4.3 e Figura 4.4 si evince come la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori delle due ripetizioni pressoché uguali per tutte le temperature di prova.

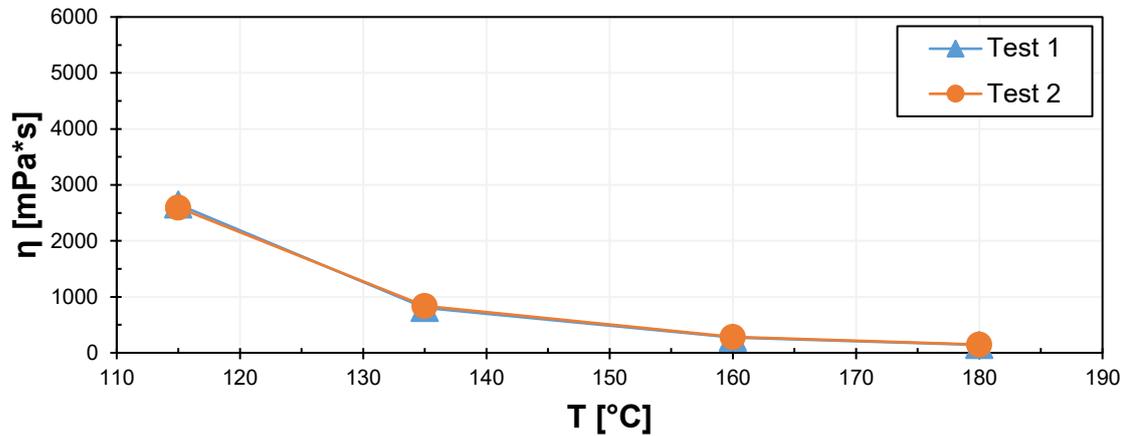


Figura 4.3 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_A”

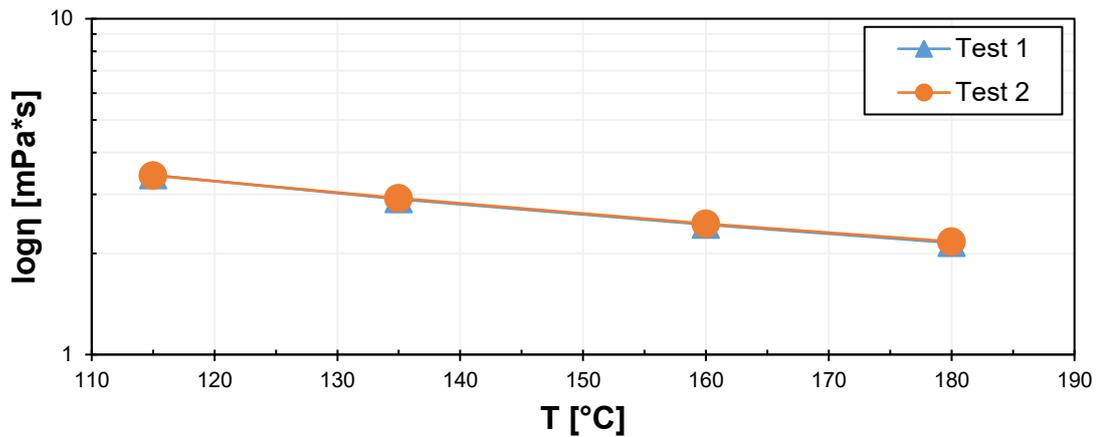


Figura 4.4 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_A”

WC_B

Da Figura 4.5 e Figura 4.6 è possibile osservare come la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori nelle due ripetizioni pressoché uguali per tutte le temperature di prova.

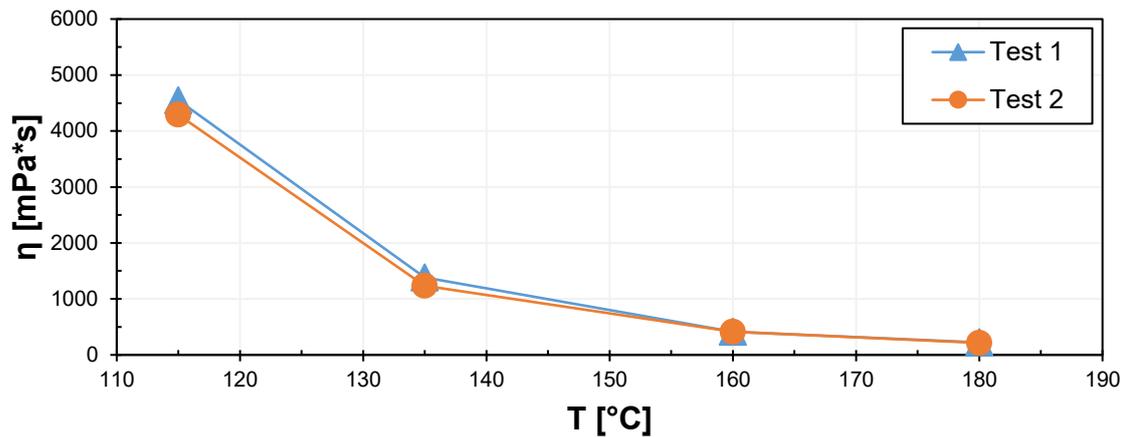


Figura 4.5 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_B”

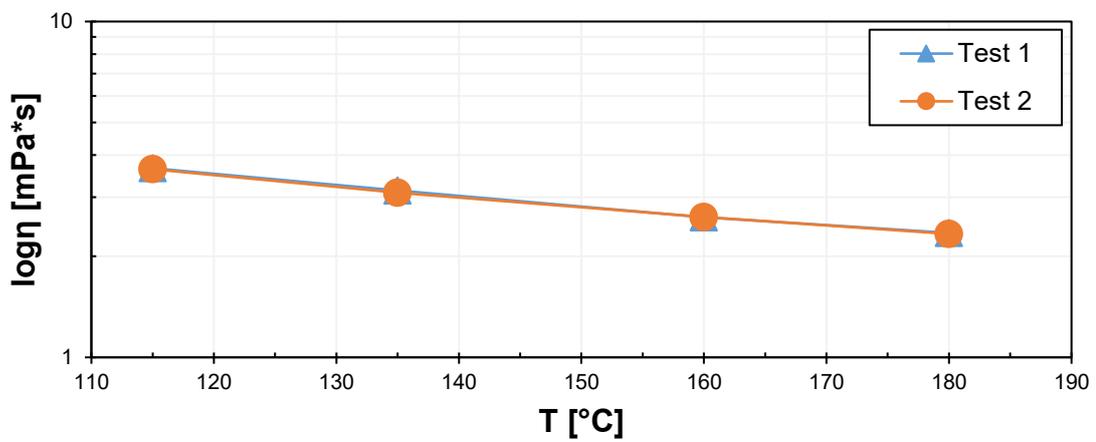


Figura 4.6 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_B”

WC_C

Osservando i grafici di seguito riportati (Figura 4.7 e Figura 4.8) è possibile affermare che la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori nelle due ripetizioni pressoché uguali per tutte le temperature di prova.

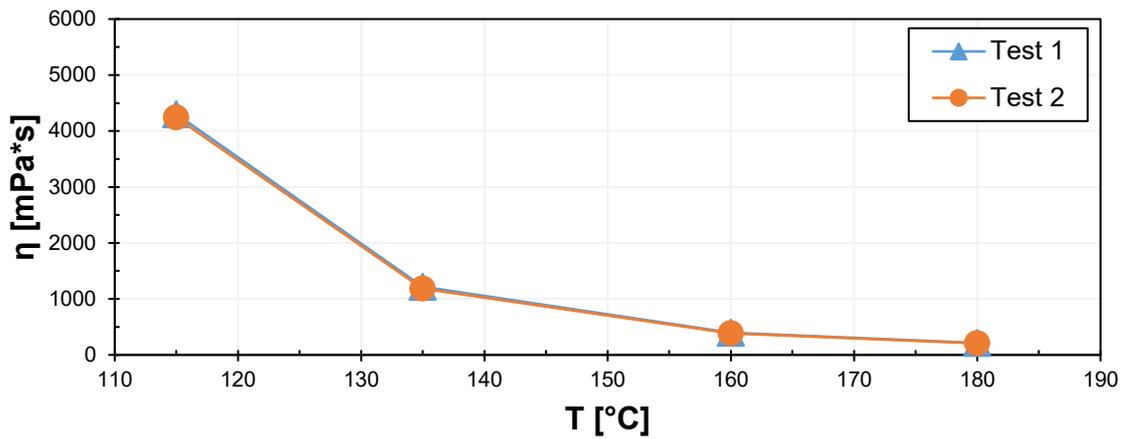


Figura 4.7 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_C”

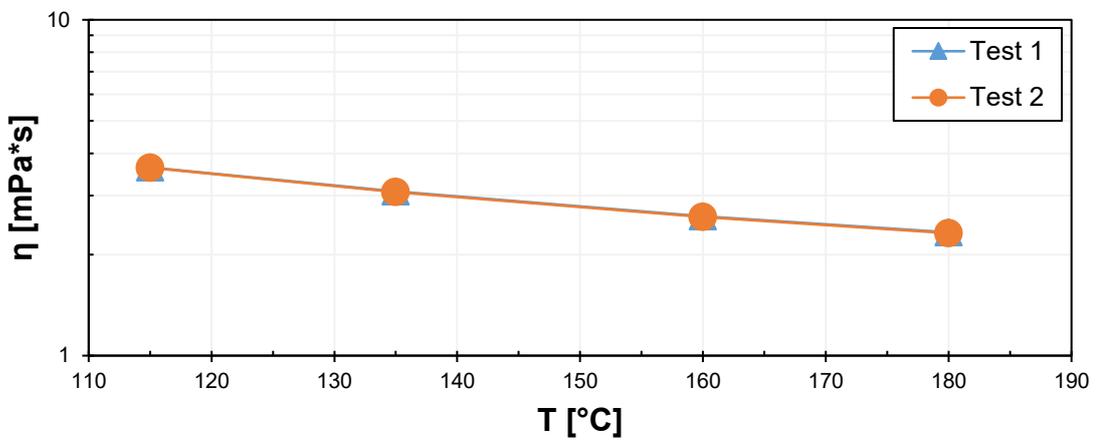


Figura 4.8 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_C”

WC_D

Osservando i grafici sotto riportati (Figura 4.9 e Figura 4.10) si evince come la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori nelle due ripetizioni confrontabili per temperature di prova superiori ai 135 °C.

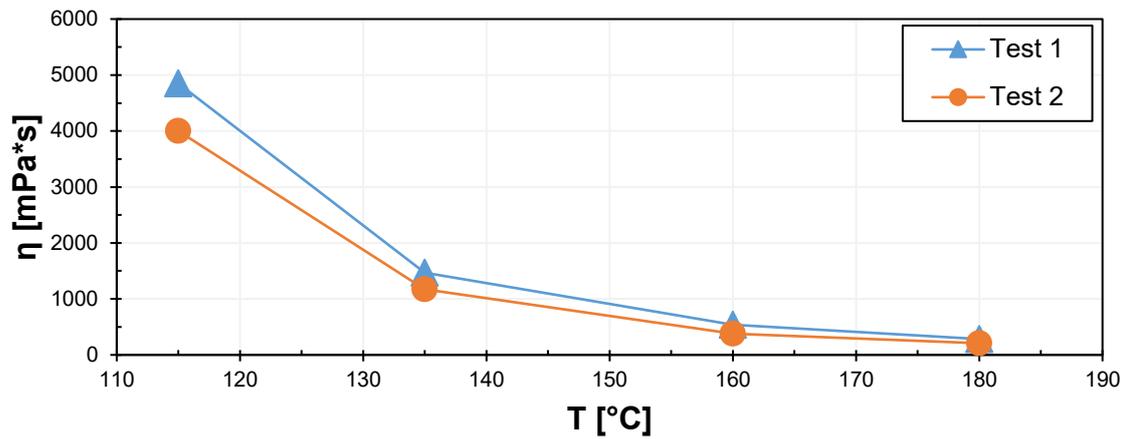


Figura 4.9 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_D”

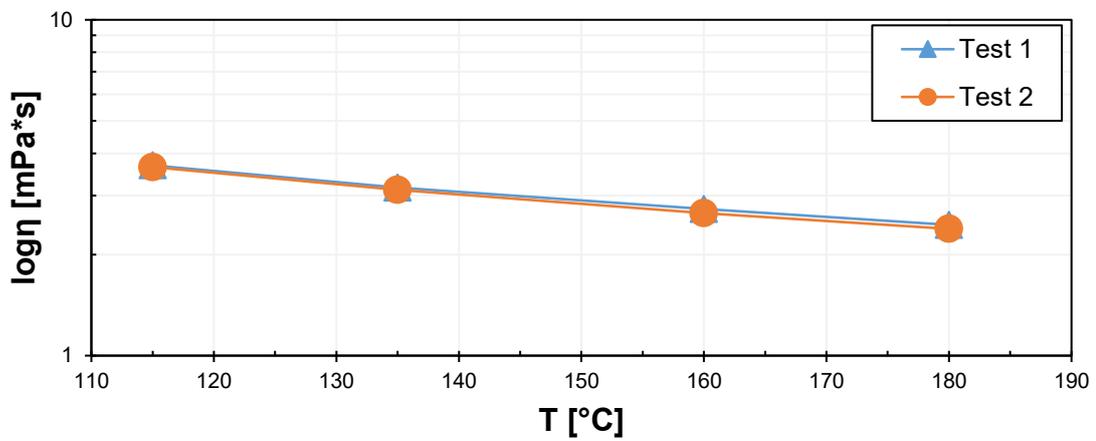


Figura 4.10 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_D”

WC_E

Da 4.11 e Figura 4.12 si evince come la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori nelle due ripetizioni pressoché uguali per tutte le temperature di prova.

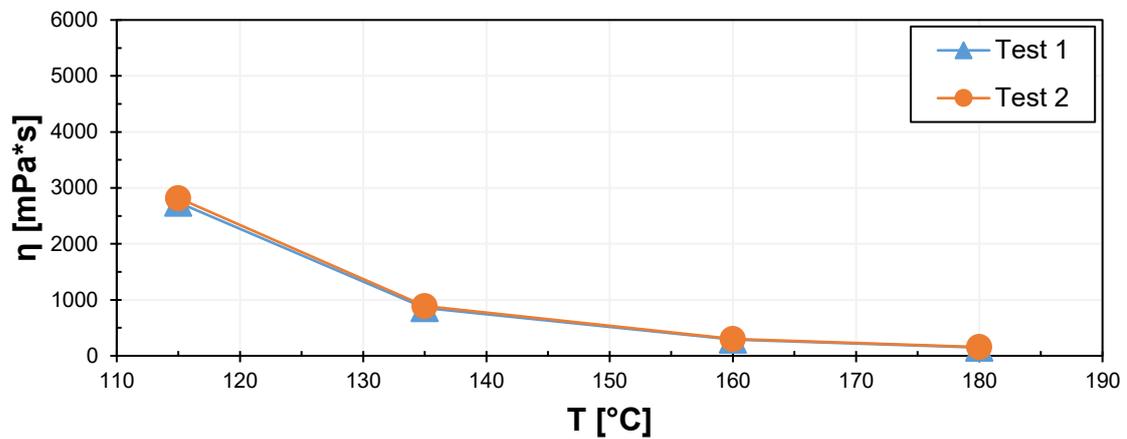


Figura 4.11 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_E”

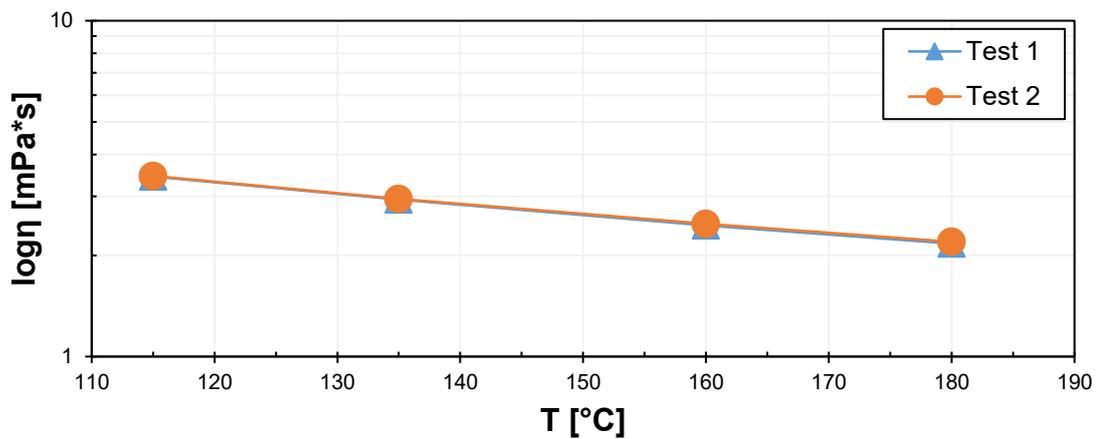


Figura 4.12 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_E”

WC_F

Osservando i grafici di seguito riportati (Figura 4.13 e Figura 4.14) è possibile affermare che la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori nelle due ripetizioni pressoché uguali per tutte le temperature di prova.

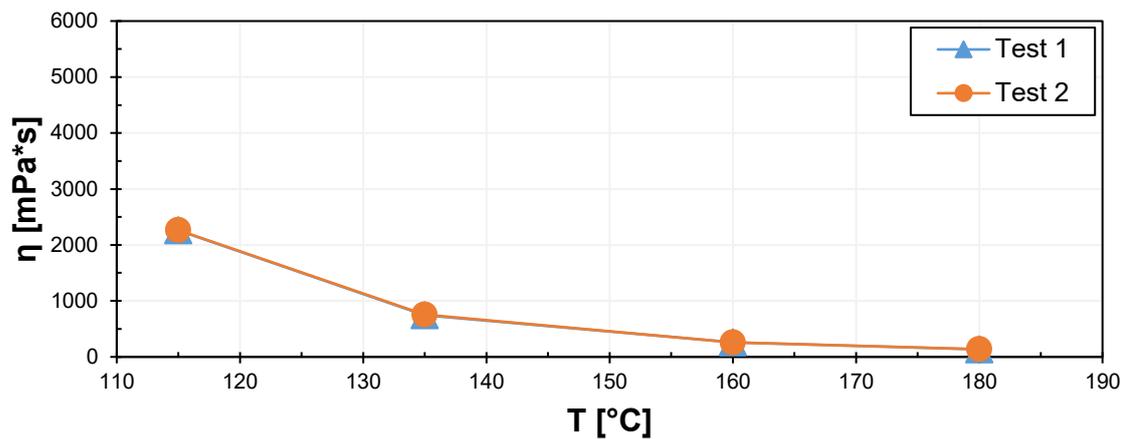


Figura 4.13 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_F”

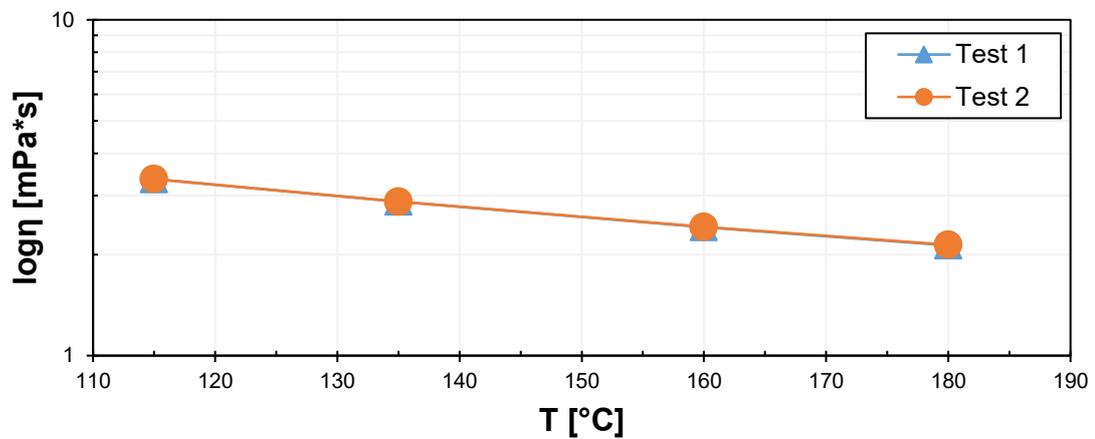


Figura 4.14 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_F”

WC_G

Analizzando i grafici di seguito riportati (Figura 4.15 e Figura 4.16) è possibile osservare come la prova di viscosità presenti una buona ripetibilità con valori nelle due ripetizioni confrontabili per tutte le temperature di prova.

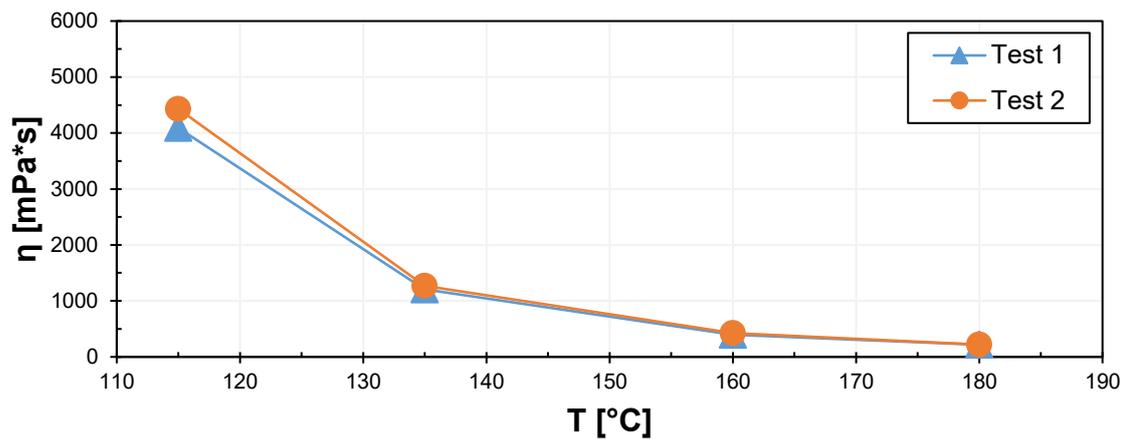


Figura 4.15 risultati della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_G”

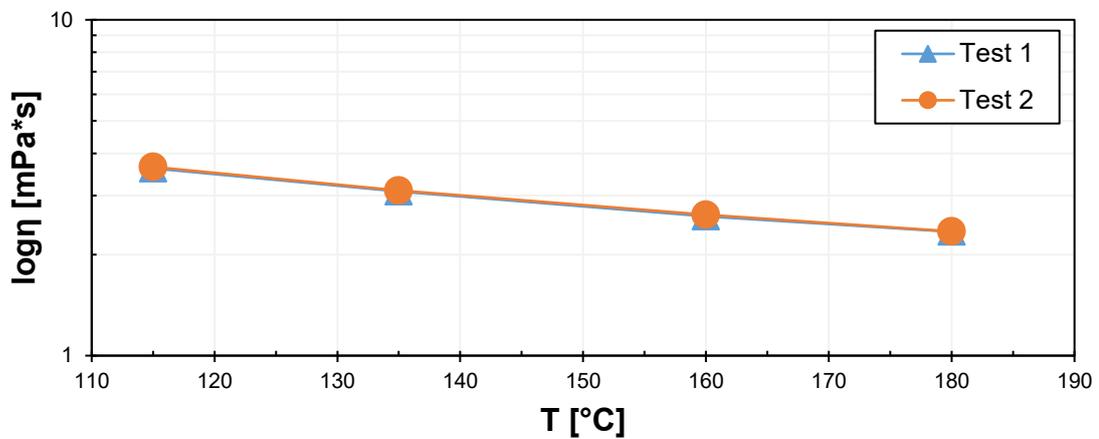


Figura 4.16 risultati del logaritmo della viscosità in funzione della temperatura relativa ai campioni “WC_G”

Confronto risultati

Dal confronto dei risultati (Figura 4.17) si evince, come già noto nella comunità scientifica di settore, che la viscosità diminuisca all'aumentare della temperatura. Prendendo come riferimento la temperatura di 135 °C (temperatura di miscelazione per conglomerati tiepidi), è possibile affermare che tutti i campioni sono caratterizzati da una simile suscettibilità termica (rette pressoché parallele tra loro). Si evince, inoltre, come la viscosità alle basse temperature diminuisca significativamente, rispetto al bitume vergine (PB), solo con il dosaggio degli additivi chimici A, E, F (W_A, W_E e W_F, rispettivamente) che possono dunque essere definiti riduttori di viscosità. Per tutti gli altri additivi chimici, invece, la viscosità rimane pressoché uguale a quella del PB per tutte le temperature di prova.

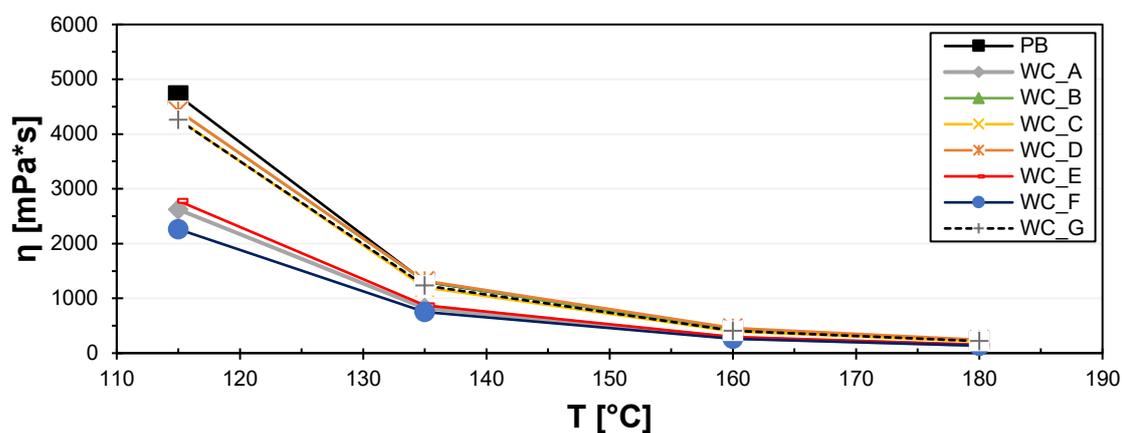


Figura 4.17 confronto risultati della viscosità in funzione della temperatura

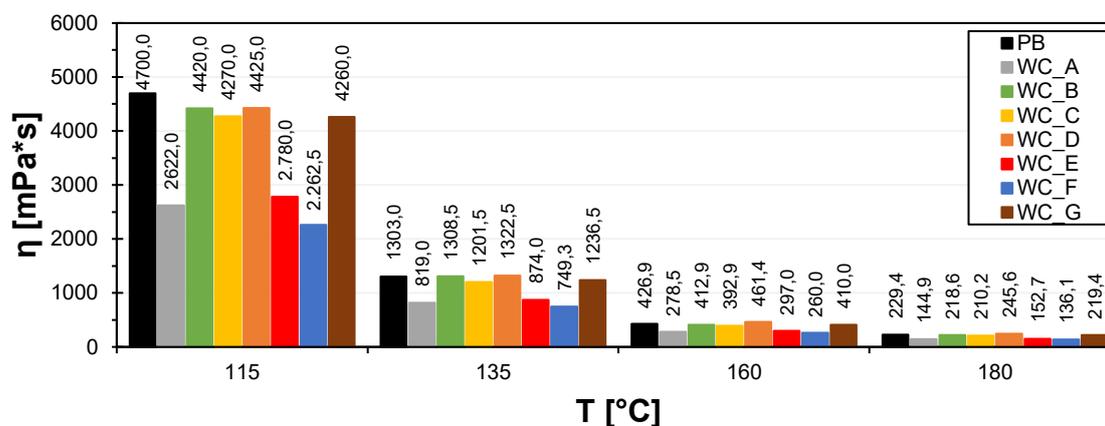


Figura 4.18 confronto risultati della viscosità in funzione della temperatura

4.1.2 Adesione

Si riportano di seguito i risultati della prova di adesione, eseguita attraverso Binder Bond Strength (BBS) test, su campioni di bitume vergine non invecchiato (*un-aged*) e non additivato (Plain Bitumen *PB*), su campioni di bitume vergine non invecchiato e additivato con i sette differenti additivi chimici (WC_i con i = A, B, C, D, E, F, G) e su campioni di bitume invecchiato a lungo termine (RTFOT + 2xPAV) non additivato e additivato. La prova è stata eseguita come suggerito da apposita normativa (AASHTO T 361-16 [30]) e nelle modalità precedentemente descritte (Cfr. 2.2.1.2). Per ogni campione si riportano i grafici relativi alla prova eseguita su bitume non invecchiato (*un-aged*) ed invecchiato (*long-term aged*). Si riporta poi, in conclusione, il grafico di confronto globale dei risultati medi di ogni campione. Nel grafico viene inoltre indicato, attraverso apposita lettera, la tipologia di rottura (A= adesiva; C= coesiva; H= ibrida).

PB (Plain Bitumen)

Dall'analisi dei grafici sotto riportati (Figura 4.19 e Figura 4.20) è possibile osservare come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una buona ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard dei grafici stessi. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.19), si evince come tutte le rotture siano di tipo adesive. Tale rottura adesiva è osservabile anche per la condizione di bitume *long-term aged* (Figura 4.20) con valori medi confrontabili tra le due condizioni.

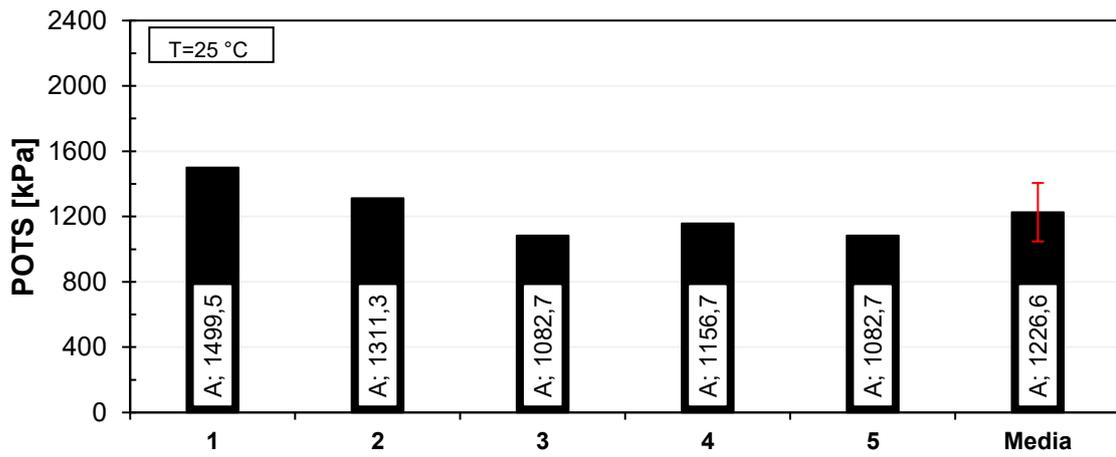


Figura 4.19 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "PB" in condizione un-aged

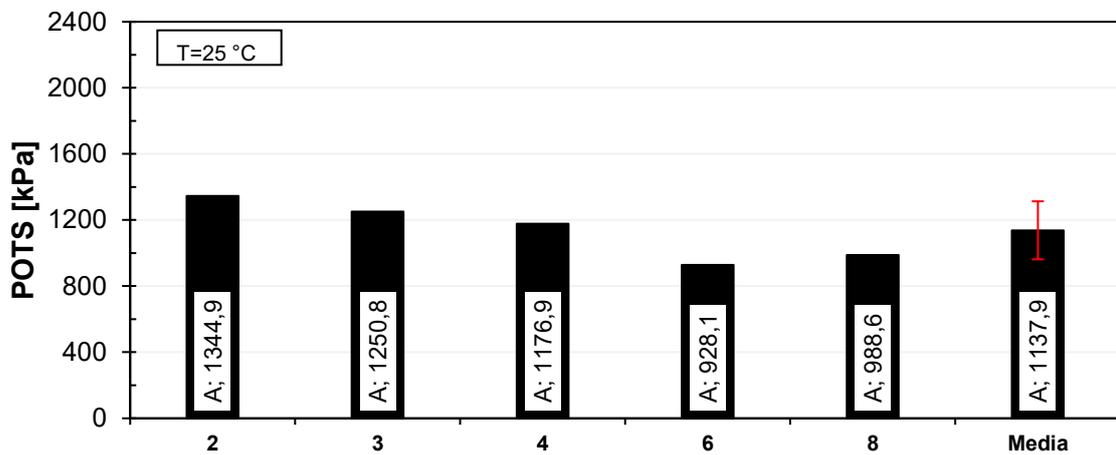


Figura 4.20 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "PB" in condizione long-term aged

WC_A

Osservando i grafici riportati (Figura 4.21 e Figura 4.22) è possibile osservare come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una buona ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard degli stessi. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.21), si evince come tutte le rotture, eccetto una, siano di tipo adesive. Da Figura 4.22 si osserva invece come, nella condizione di bitume *long-term aged*, tutte le rotture siano di tipo adesivo.

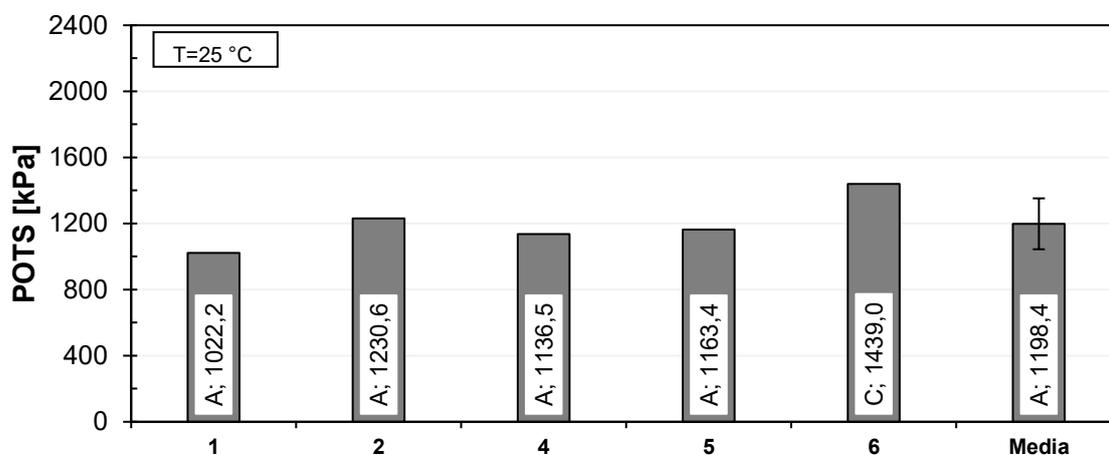


Figura 4.21 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_A" in condizione un-aged

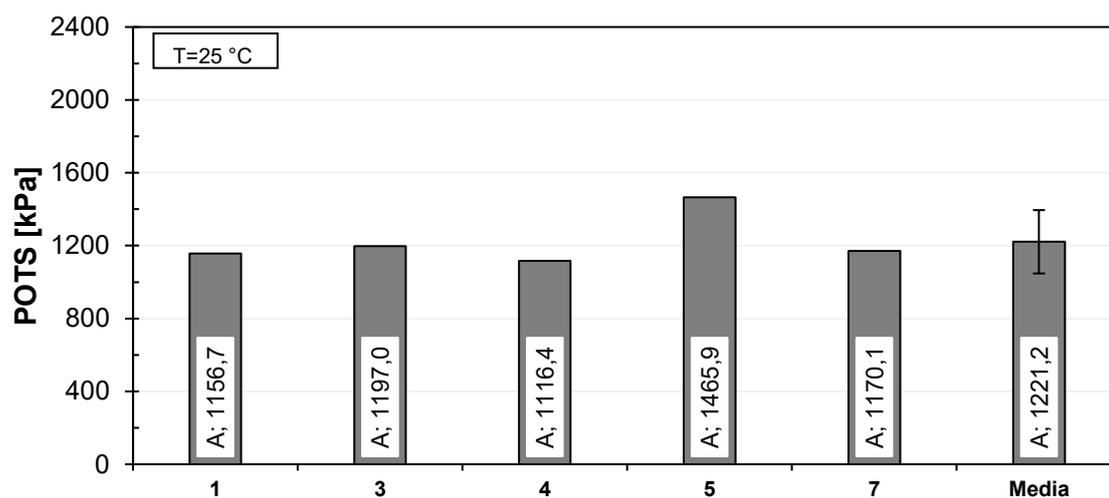


Figura 4.22 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_A" in condizione long-term aged

WC_B

Dai risultati della prova sotto riportati (Figura 4.23 e Figura 4.24) è possibile osservare come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una ottima ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard degli stessi. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.23), si evince come tutte le rotture, eccetto una, siano di tipo adesive. Da Figura 4.24 si evince come, nella condizione di bitume *long-term aged*, le rotture siano principalmente adesive eccetto due di tipo ibrido.

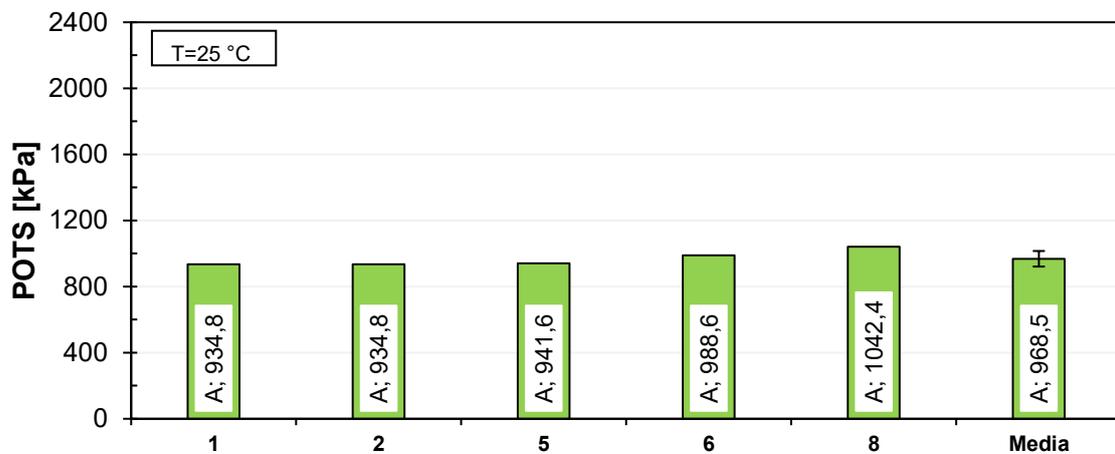


Figura 4.23 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_B" in condizione un-aged

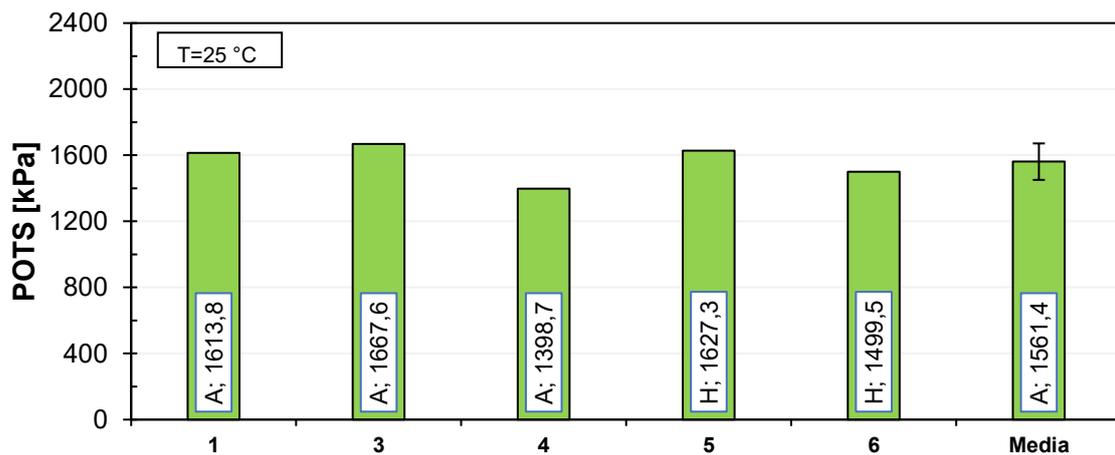


Figura 4.24 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_B" in condizione long-term aged

WC_C

Analizzando i grafici sotto riportati (Figura 4.25 e Figura 4.26) si evince come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una buona ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard degli stessi. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.25), è possibile osservare come tutte le rotture siano di tipo coesivo mentre, da Figura 4.26 si osserva come, nella condizione di bitume *long-term aged*, le rotture diventino prevalentemente ibride ad eccezione di una.

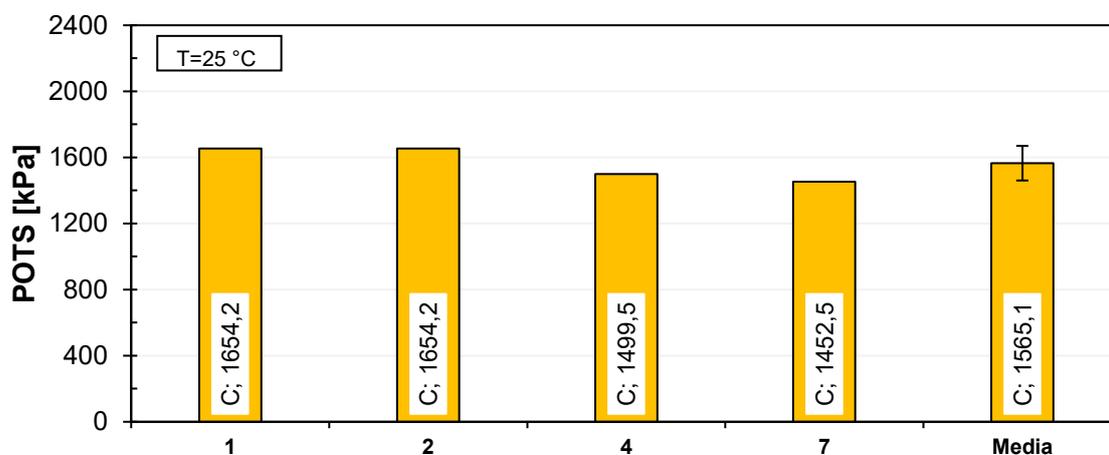


Figura 4.25 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_C" in condizione un-aged

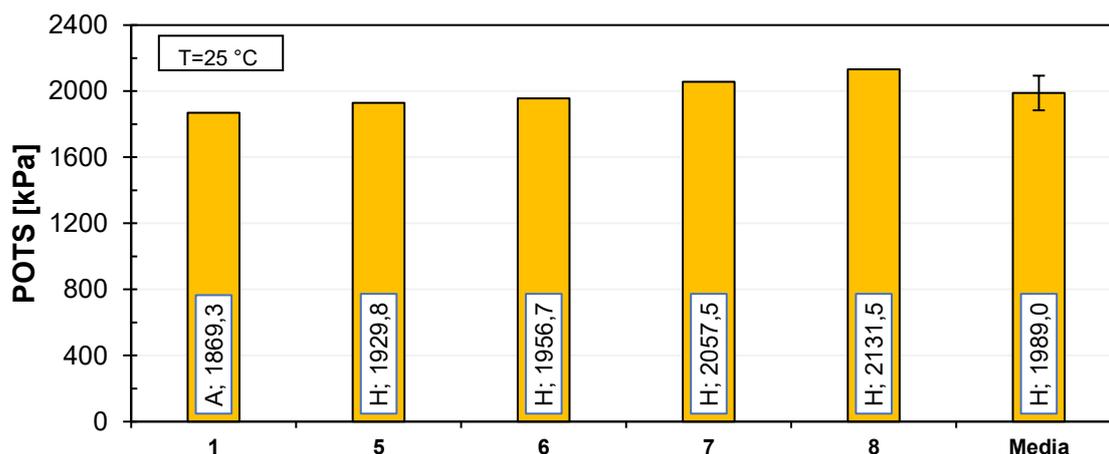


Figura 4.26 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_C" in condizione long-term aged

WC_D

Analizzando i grafici riportati (Figura 4.27 e Figura 4.28) è possibile osservare come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una buona ripetibilità. Questo risulta essere evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard dei grafici. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.27), si evince come tutte le rotture siano di tipo coesivo mentre, per la condizione di bitume *long-term aged* (Figura 4.28) le rotture siano tutte adesive ad eccezione di un unico caso.

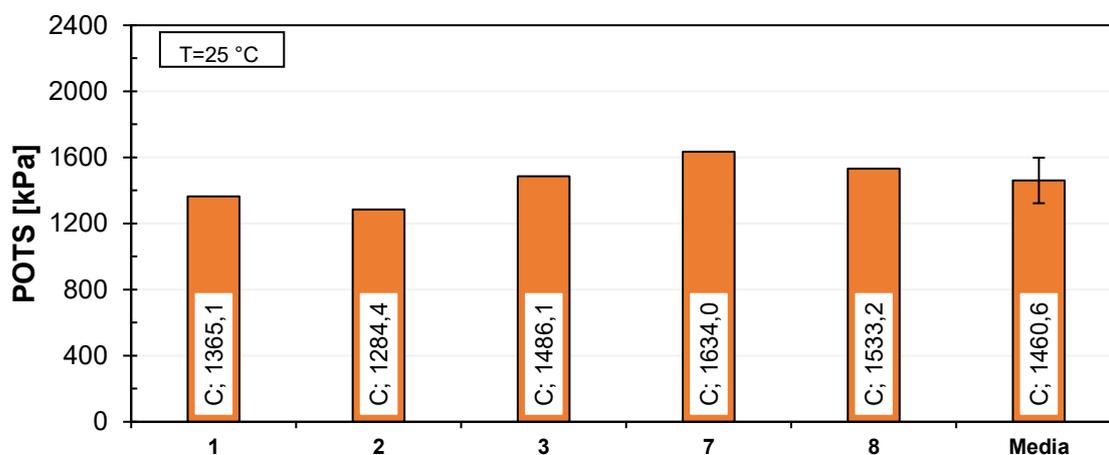


Figura 4.27 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_D" in condizione un- aged

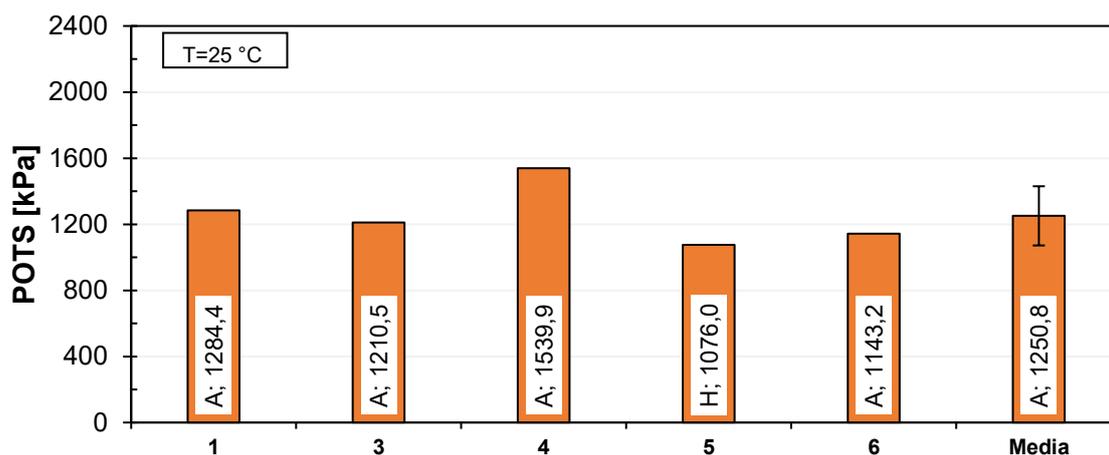


Figura 4.28 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_D" in condizione long-term aged

WC_E

Dai risultati della prova sotto riportati (Figura 4.29 e Figura 4.30) è possibile osservare come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una ottima ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.29), si evince come le rotture siano prevalentemente ibride ad eccezione di due rotture coesive. Osservando invece i risultati per la condizione di bitume *long-term aged* (Figura 4.30), si evince come tutte le rotture siano adesive.

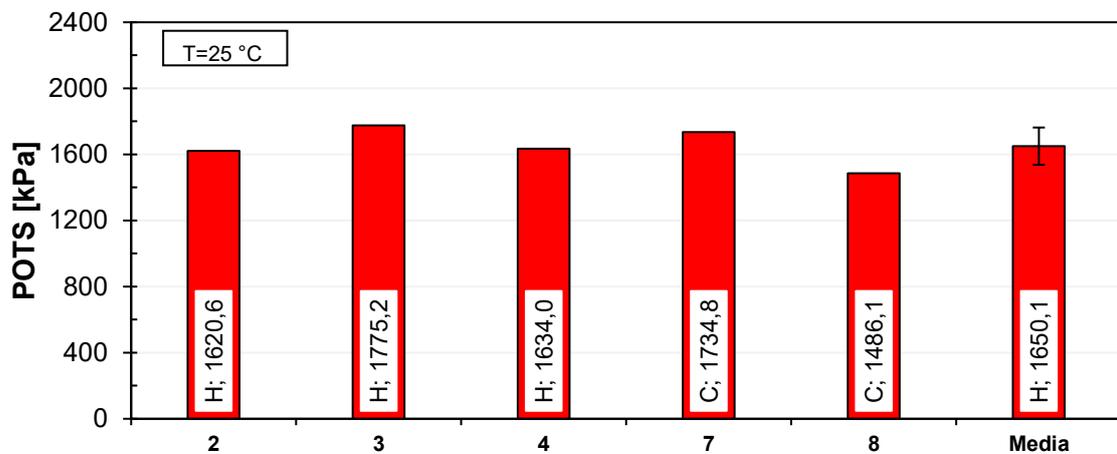


Figura 4.29 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_E" in condizione un-aged

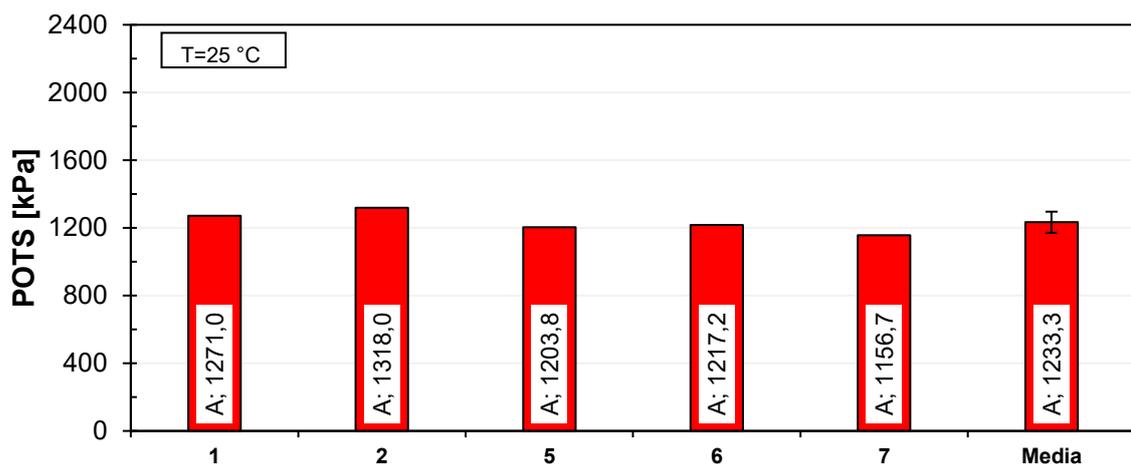


Figura 4.30 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_E" in condizione long-term aged

WC_F

Dall'analisi dei grafici sotto riportati (Figura 4.31 e Figura 4.32) è possibile osservare come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una ottima ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.31), si evince come le rotture siano tutte coesive mentre, da Figura 4.32, per bitume in condizione *long-term aged*, tutte le rotture sono di tipo adesivo ad eccezione di una rottura coesiva e una ibrida.

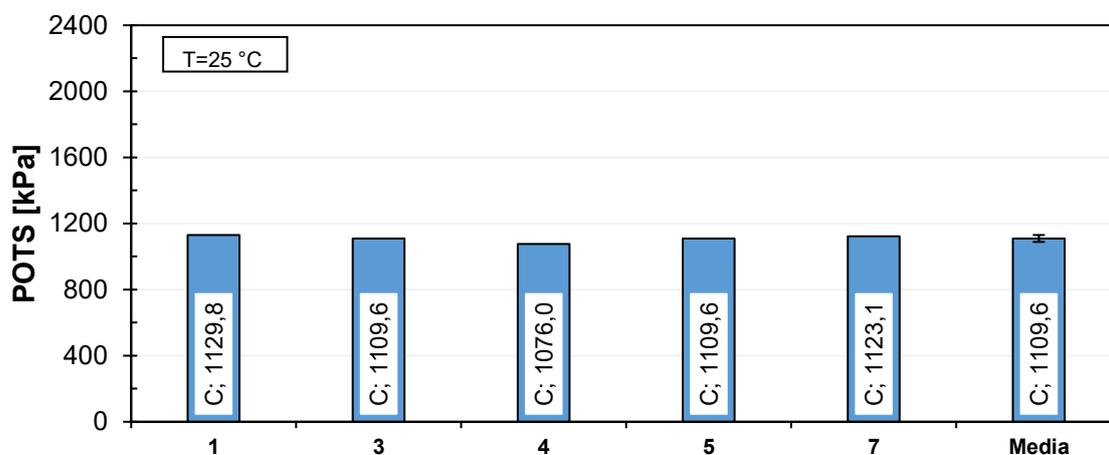


Figura 4.31 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_F" in condizione un-aged

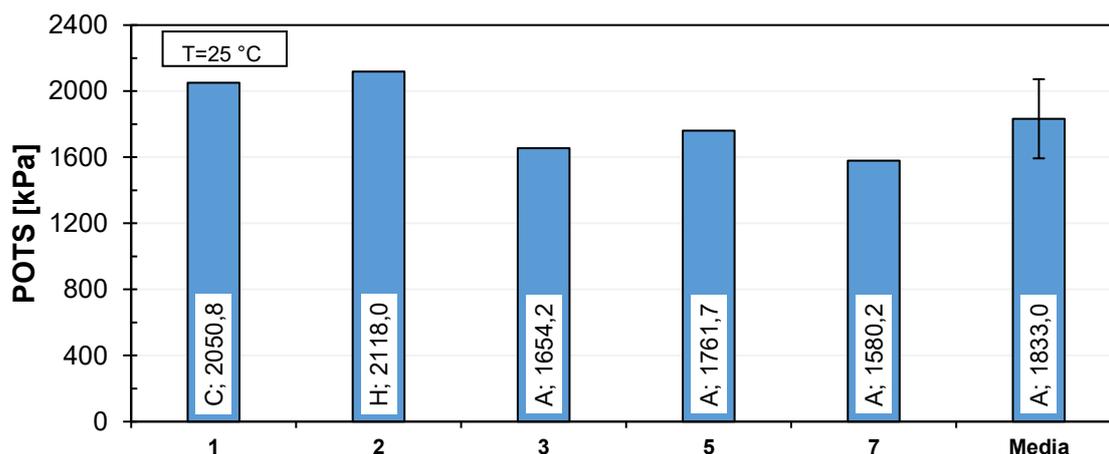


Figura 4.32 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_F" in condizione long-term aged

WC_G

Analizzando i grafici riportati (Figura 4.33 e Figura 4.34) si evince come la prova, in entrambe le condizioni, presenti una buona ripetibilità evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard degli stessi. In riferimento alla condizione di bitume *un-aged* (Figura 4.33), è possibile osservare come tutte le rotture siano di tipo coesivo ad eccezione di una rottura di tipo adesivo e una ibrida. Da Figura 4.34 si osserva, invece, come nella condizione di bitume *long-term aged* le rotture diventino adesive.

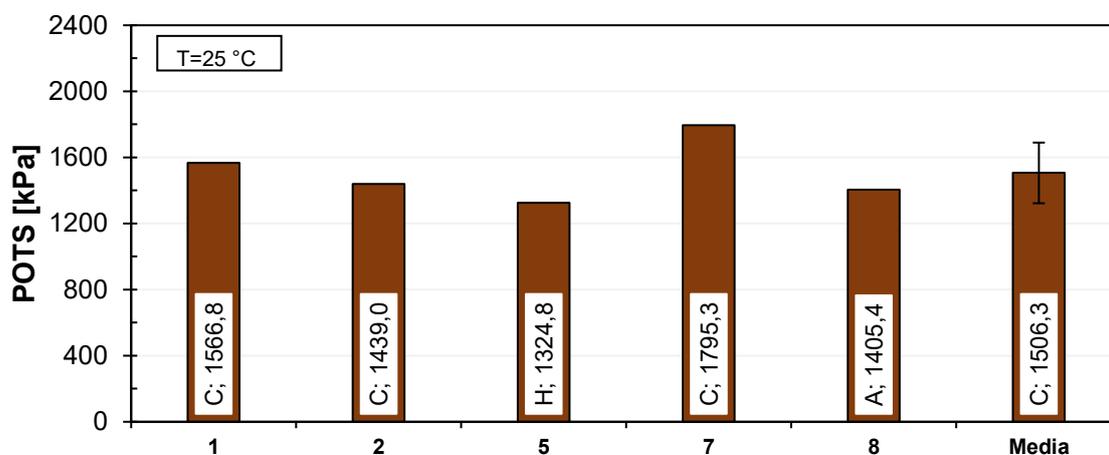


Figura 4.33 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_G" in condizione un-aged

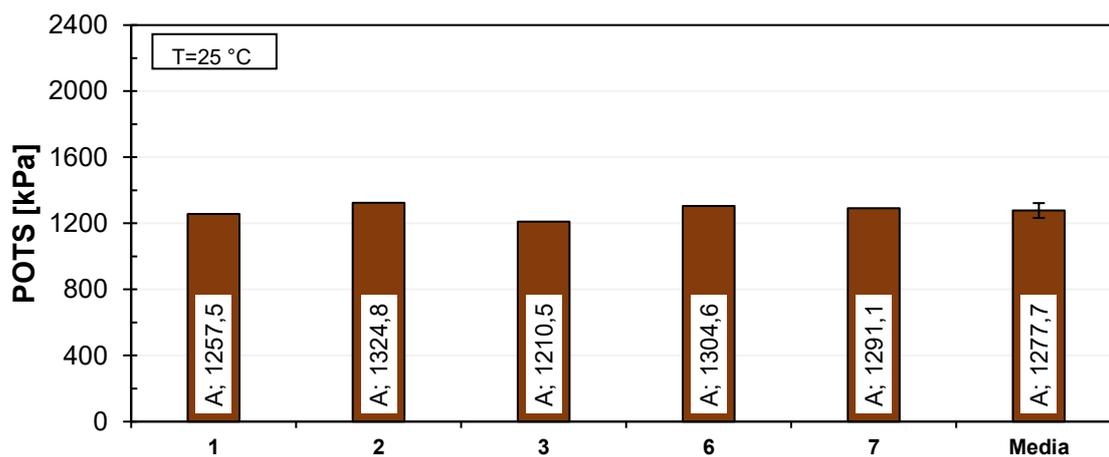


Figura 4.34 risultati dell'adesione bitume-aggregato relativa ai campioni "WC_G" in condizione long-term aged

Confronto risultati

Analizzando la Figura 4.35 (confronto dei risultati), si evince come l'adesione bitume-aggregato, in condizione di bitume vergine (non invecchiato), dipenda fortemente dall'additivo chimico dosato. Il grafico mostra come gli additivi B, F riducano l'adesione rispetto al Plain Bitumen *PB* mentre gli additivi C, D, E, G la incrementano. Osservando invece i risultati ottenuti in condizione di bitume invecchiato (*long-term aged*) (Figura 4.35) si evince come, anche in questo caso, la tipologia di additivo influenza significativamente la condizione di adesione bitume-aggregato e, in particolare, come gli additivi chimici C, D, F permettano un incremento di adesione mentre A, B, E, G non influenzano sul risultato della prova rispetto al PB. È possibile osservare, inoltre, come il valore di POTS (indice dell'adesione bitume-aggregato) dipenda dalla tipologia di rottura e, in generale, come un valore più elevato di tale parametro coincida con una rottura di tipo coesiva o ibrida ad eccezione dell'additivo F dove tale condizione di rottura non coincide con un alto valore POTS. Si osserva, inoltre, come il valore POTS per il PB non vari tra la condizione un-aged a quella long-term aged. Si potrebbe, sulla base dei risultati ottenuti, affermare come gli additivi chimici C, D, E, G (rispettivamente W_C, W_D, W_E e W_G) siano degli attivanti di adesione nella condizione di bitume vergine mentre, gli additivi B, C, F (rispettivamente W_B, W_C e W_F) siano degli attivanti di adesione per condizioni di bitume invecchiato.

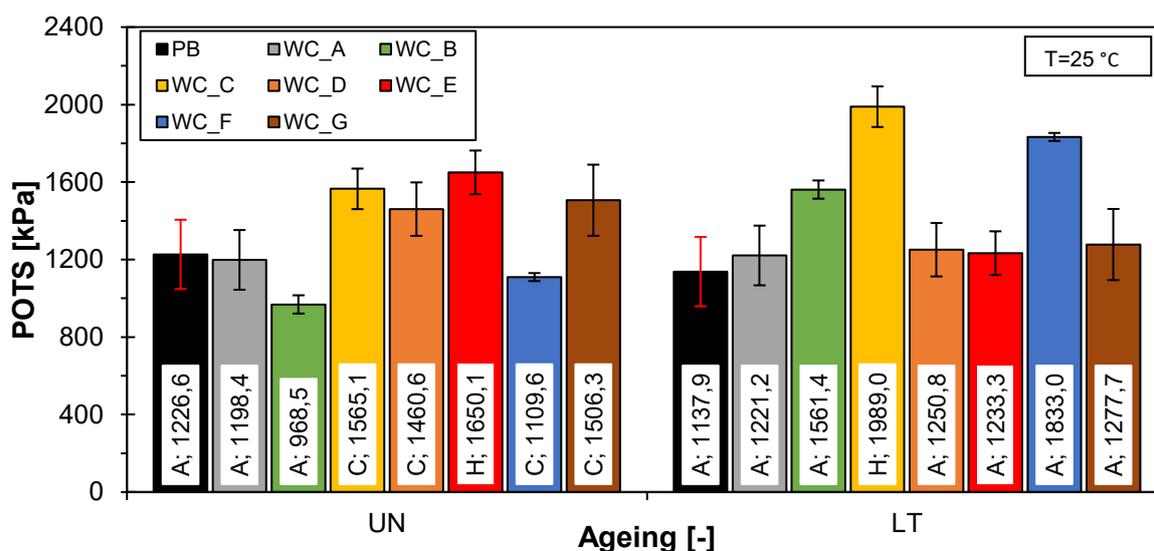


Figura 4.35 confronto risultati dell'adesione bitume-aggregato per la condizione un-aged e per la condizione long-term aged

4.2 Fase 2: miscele

Nella seconda fase della sperimentazione, si è proceduto nel confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso e nella realizzazione dei provini cilindrici da testare poi per la caratterizzazione meccanica degli stessi. Si procede, di seguito, nell'esposizione dei risultati.

4.2.1 Proprietà volumetriche e studio della lavorabilità

Si riportano, di seguito, i risultati dello studio delle proprietà volumetriche e di lavorabilità eseguite sui provini confezionati delle differenti miscele bituminose. Lo studio delle proprietà volumetriche, condotto come precedentemente descritto (Cfr. 2.2.2.3), si è basato sulla determinazione dei vuoti contenuti all'interno dei provini confezionati (intervallo target da Capitolato 3÷5%) mentre, lo studio della lavorabilità è stato eseguito prendendo come riferimento il parametro CEI (*Compaction Energy Index*) determinato come descritto al paragrafo 2.2.2.4. Di ogni miscela e per ogni provino confezionato, attraverso apposito grafico, si riportano i vuoti contenuti e il valore del parametro CEI. Si riporta, infine, il confronto globale tra le miscele confezionate prendendo come riferimento i valori medi ottenuti di ogni miscela stessa.

DG30H

Analizzando il grafico sottostante (Figura 4.36) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, dato evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard.

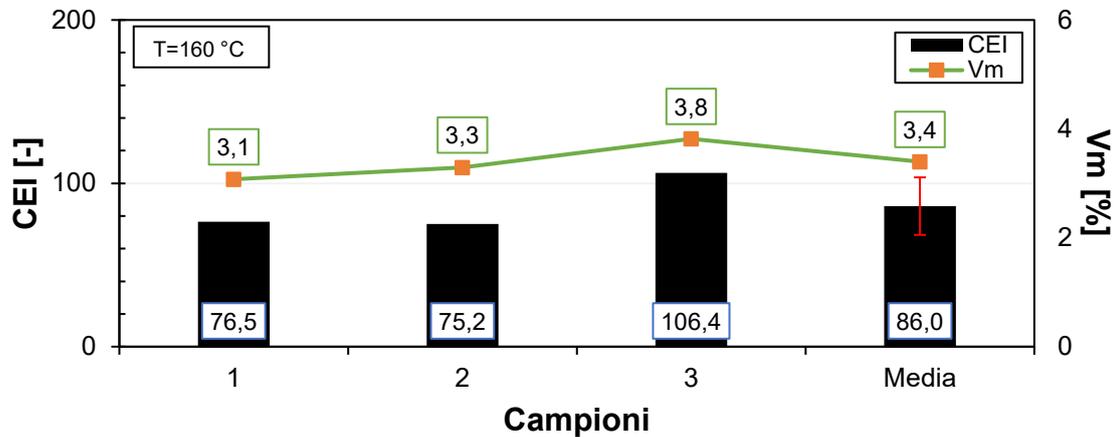


Figura 4.36 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30H”

DG30W

Dall’analisi dei risultati (Figura 4.37) è possibile osservare come la prova presenti una sufficiente ripetibilità evidenziata anche dalla deviazione standard.

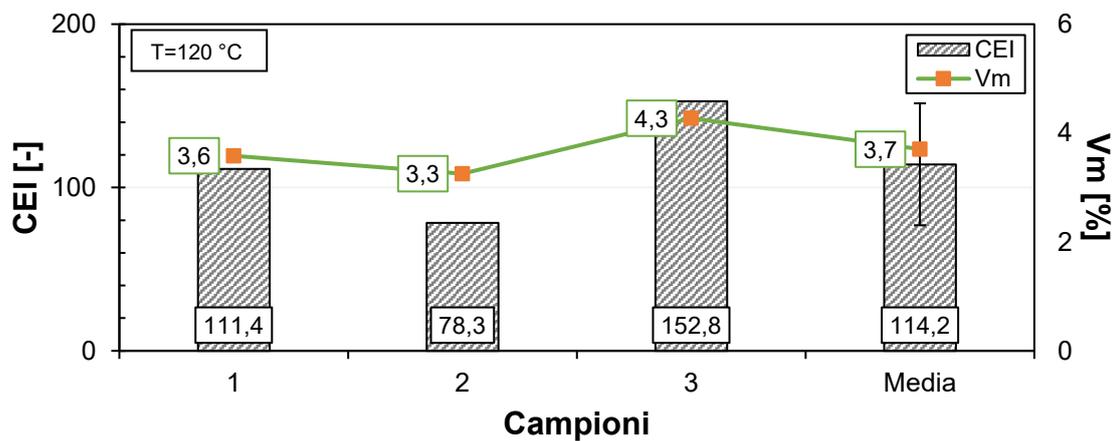


Figura 4.37 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30W”

DG30W_A

Osservando il grafico sotto riportato (Figura 4.38) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, dato evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard.

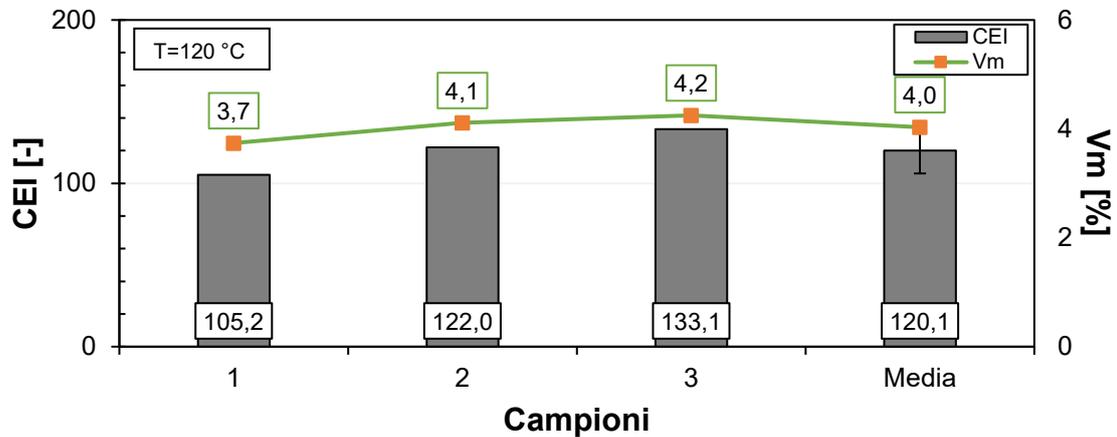


Figura 4.38 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30W_A”

DG30W_B

Dall’analisi dei risultati (Figura 4.39) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato dalla deviazione standard.

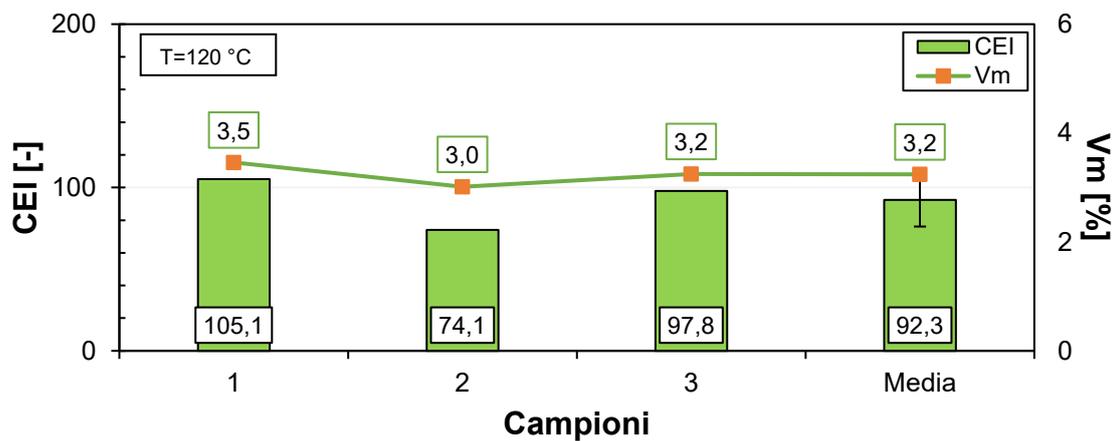


Figura 4.39 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30W_B”

DG30W_C

Analizzando i risultati ottenuti (Figura 4.40) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla deviazione standard.

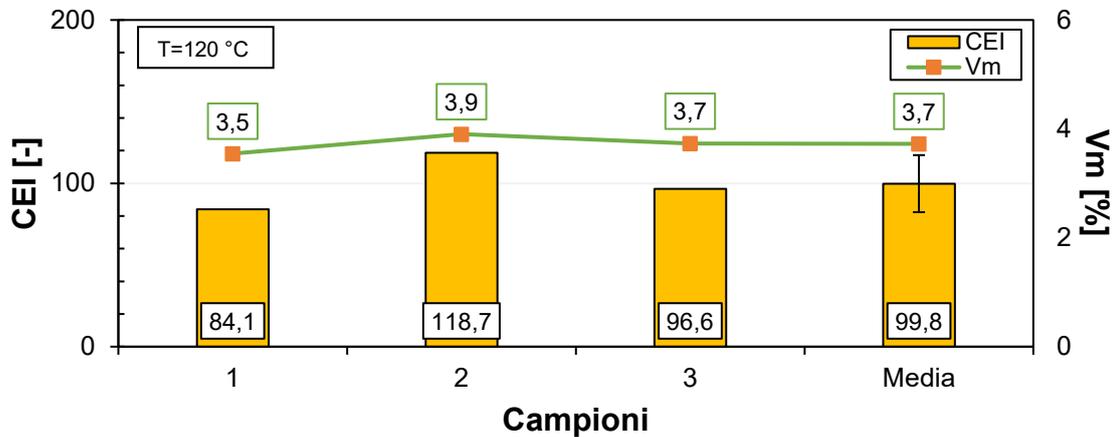


Figura 4.40 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30W_C”

DG30W_D

Analizzando il grafico sottostante (Figura 4.41) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard.

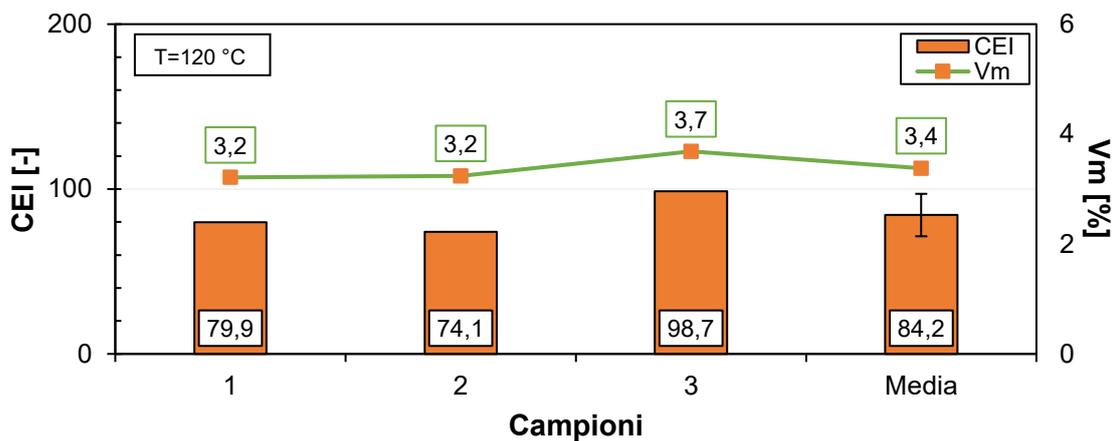


Figura 4.41 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30W_D”

DG30W_E

Dall'analisi dei risultati (Figura 4.42) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato dalla deviazione standard.

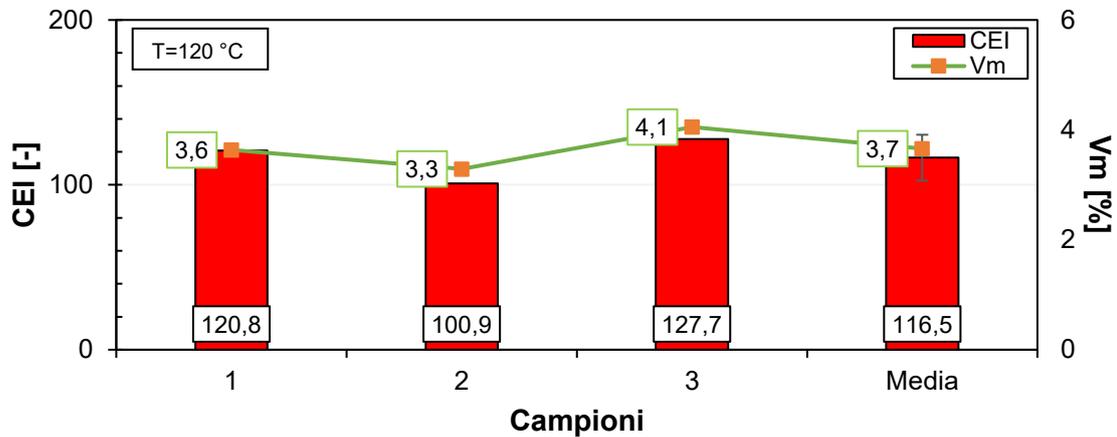


Figura 4.42 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela "DG30W_E"

DG30W_F

Osservando il grafico sottostante (Figura 4.43) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, dato osservabile anche dalla contenuta deviazione standard.

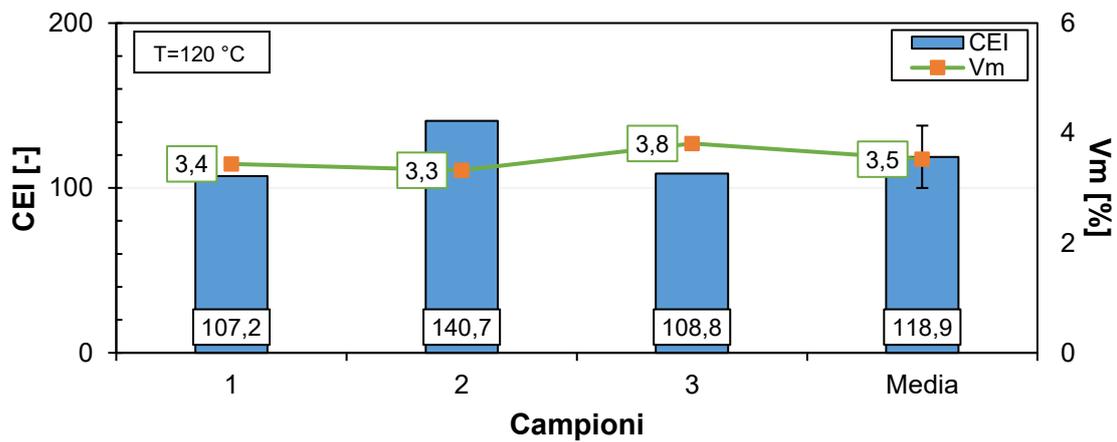


Figura 4.43 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela "DG30W_F"

DG30W_G

Dall'analisi dei risultati (Figura 4.44) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla deviazione standard.

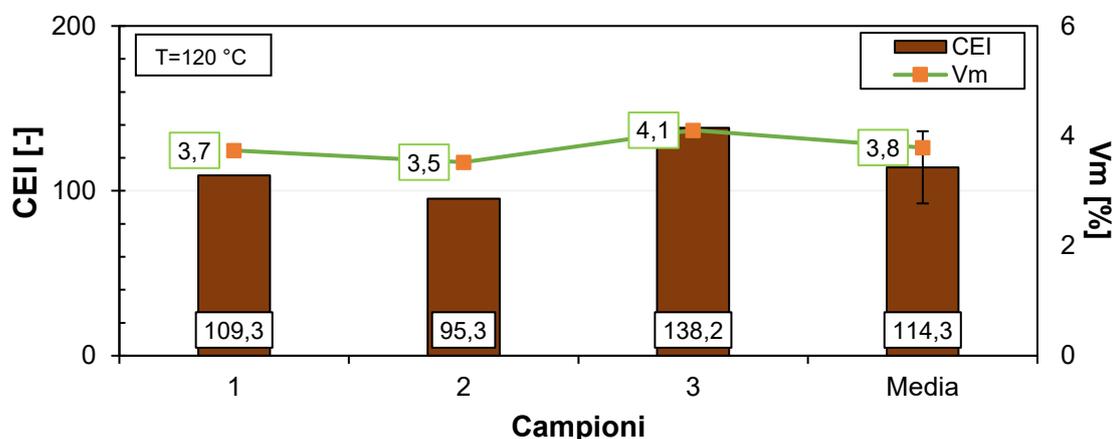


Figura 4.44 risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità della miscela “DG30W_G”

Confronto risultati

Dal confronto dei risultati (Figura 4.45) è possibile osservare, prima di tutto, come la percentuale di vuoti contenuti all'interno dei provini aumenti all'aumentare del parametro CEI (dunque minore lavorabilità della miscela), come già affermato e noto da precedenti studi. In tutte le miscele, inoltre, è stato rispettato l'intervallo target di vuoti contenuti (3÷5%) come previsto da Capitolato. Da figura 4.45 si evince poi, come la lavorabilità della miscela tradizionale HMA sia notevolmente superiore a quella della miscela WMA senza additivo chimico (parametro CEI minore) e che vari fortemente, nelle miscele WMA additivate, al variare dell'additivo stesso dosato. Si osserva, infatti, come non tutti gli additivi chimici permettano una riduzione del parametro CEI nelle miscele WMA e che una lavorabilità confrontabile con quella della tradizionale miscela a caldo (DG30H) sia raggiunta solo con il dosaggio degli additivi B, C, D (DG30W_B, DG30W_C e DG30W_D, rispettivamente) mentre, tutti gli altri additivi non agiscono migliorando la lavorabilità che rimane pressoché invariata rispetto la miscela di riferimento non additivato (DG30W).

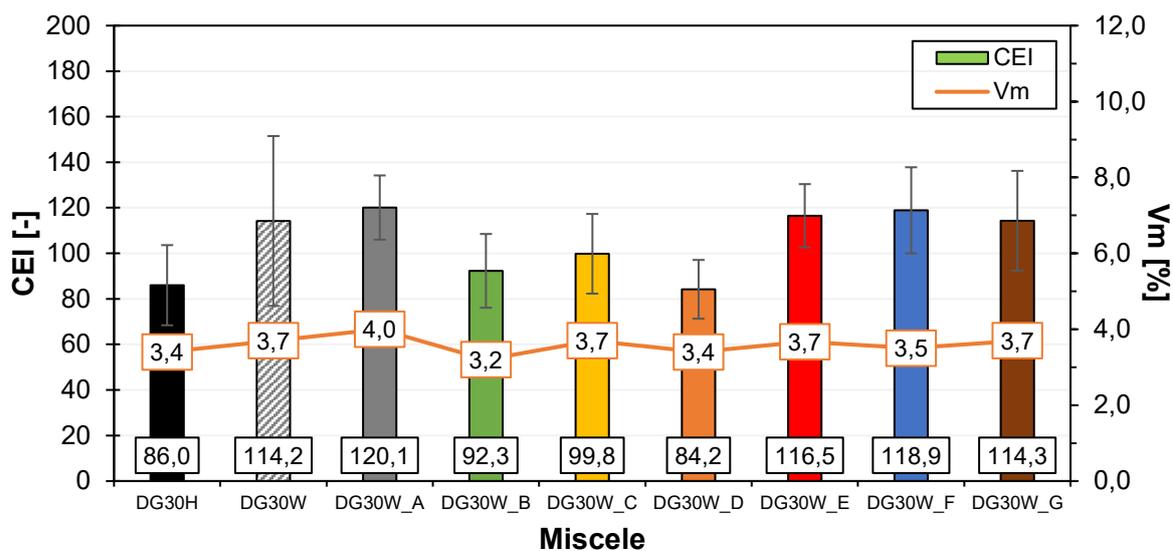


Figura 4.45 confronto dei risultati relativi alle proprietà volumetriche e di lavorabilità

4.2.2 Modulo a trazione indiretta

Si riportano, di seguito, i risultati dello studio del modulo elastico a trazione indiretta dei provini di conglomerato bituminoso determinati attraverso la prova di modulo a trazione indiretta *ITSM* in conformità con quanto previsto da apposita normativa UNI EN 12687-26 [37] e nelle modalità precedentemente descritte (Cfr. 2.2.2.5). Per ogni miscela si riportano, insieme al contenuto di vuoti, i risultati, in termini di valore *ITSM*, di ogni provino. Si riporta, infine, il confronto tra i valori medi ottenuti per ogni miscela testata.

DG30H

Osservando il grafico sotto riportato (Figura 4.46) è possibile affermare che la prova presenta una ottima ripetibilità, la quale è evidenziata da una minima deviazione standard.

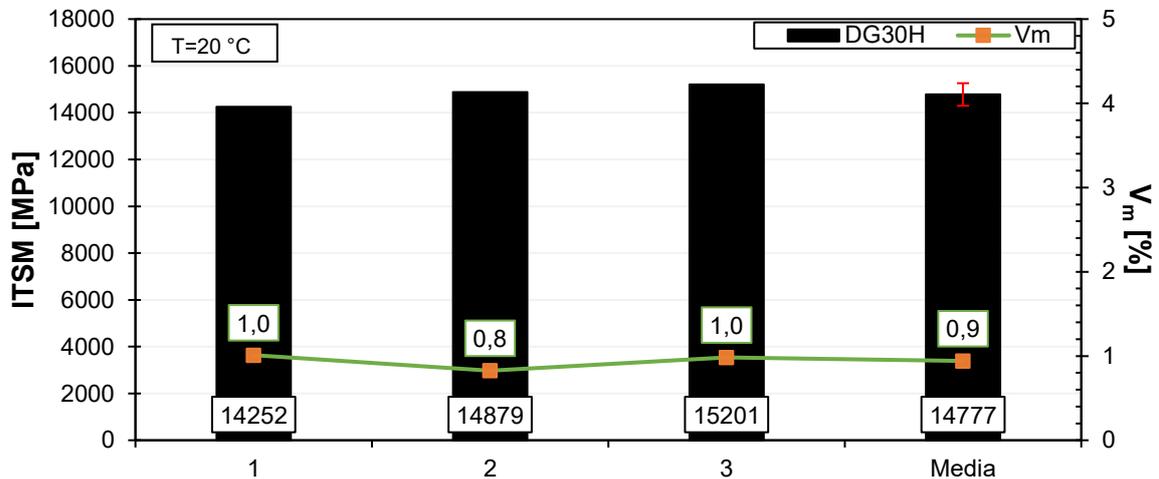


Figura 4.46 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30H”

DG30W

Analizzando il grafico sotto riportato (Figura 4.47) è possibile osservare che la prova presenta una buona ripetibilità, dato evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard. È possibile osservare, inoltre, come il modulo elastico sia superiore per provini con minor contenuto di vuoti.

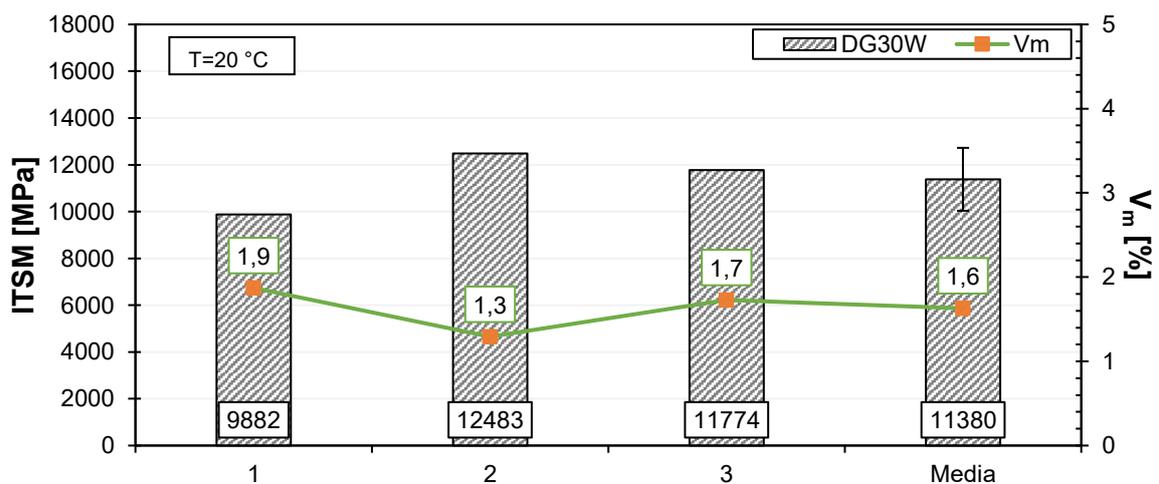


Figura 4.47 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W”

DG30W_A

Osservando i risultati ottenuti (Figura 4.48) è possibile osservare che la prova presenti una buona ripetibilità, la quale viene evidenziata anche dalla contenuta deviazione standard. Si osserva, inoltre, come il modulo elastico sia superiore per provini con minor contenuto di vuoti.

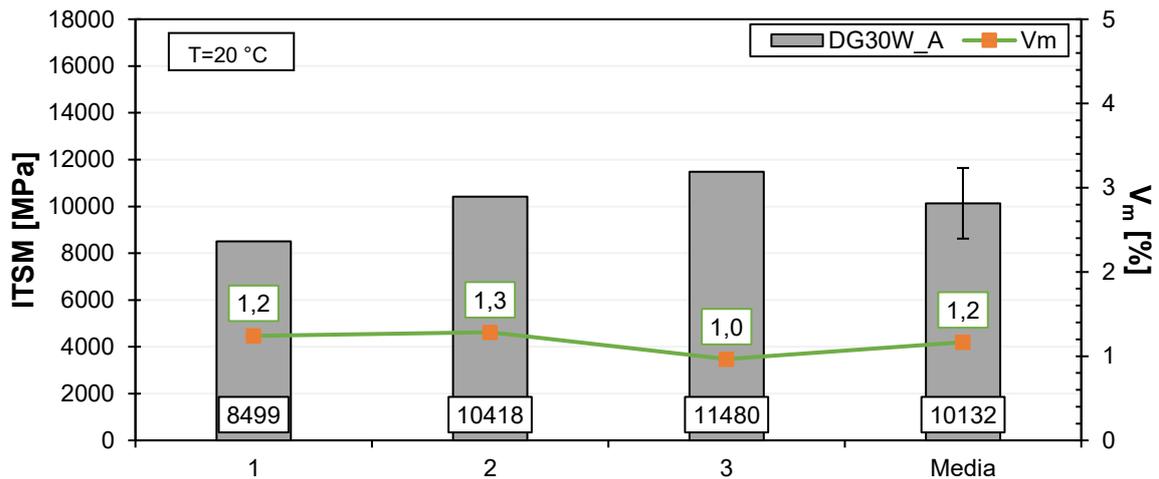


Figura 4.48 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_A”

DG30W_B

In riferimento ai risultati sotto riportati (Figura 4.49) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità, che viene evidenziata anche dalla contenuta deviazione standard.

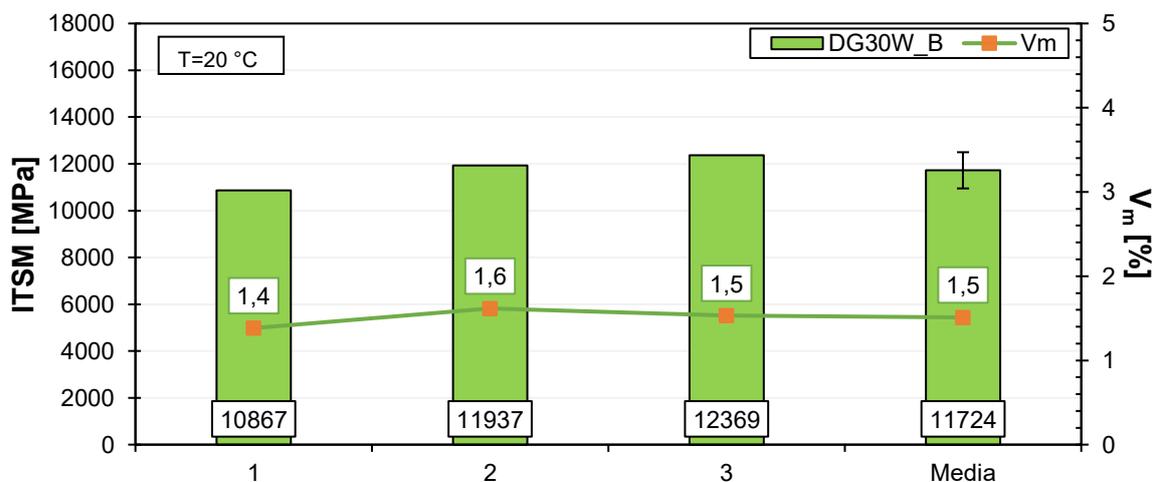


Figura 4.49 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_B”

DG30W_C

Osservando il grafico sotto riportato (Figura 4.50) è possibile affermare che la prova presenti una ottima ripetibilità evidenziato anche da una minima deviazione standard.

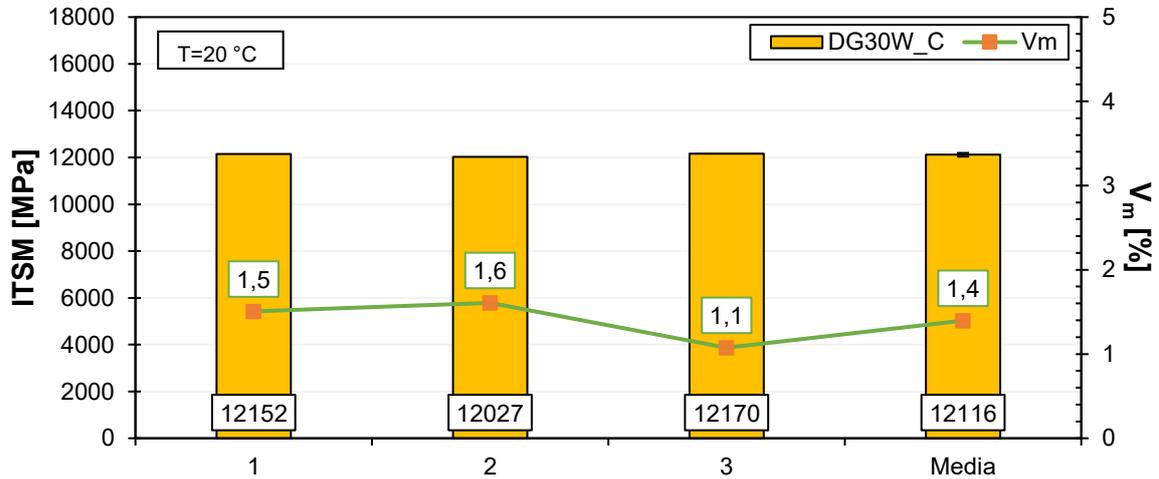


Figura 4.50 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_C”

DG30W_D

Analizzando i risultati riportati (Figura 4.51) è possibile osservare come la prova presenti una buona ripetibilità evidenziata da una contenuta deviazione standard. Si osserva, inoltre, come il modulo elastico sia superiore per provini con maggiore contenuto di vuoti.

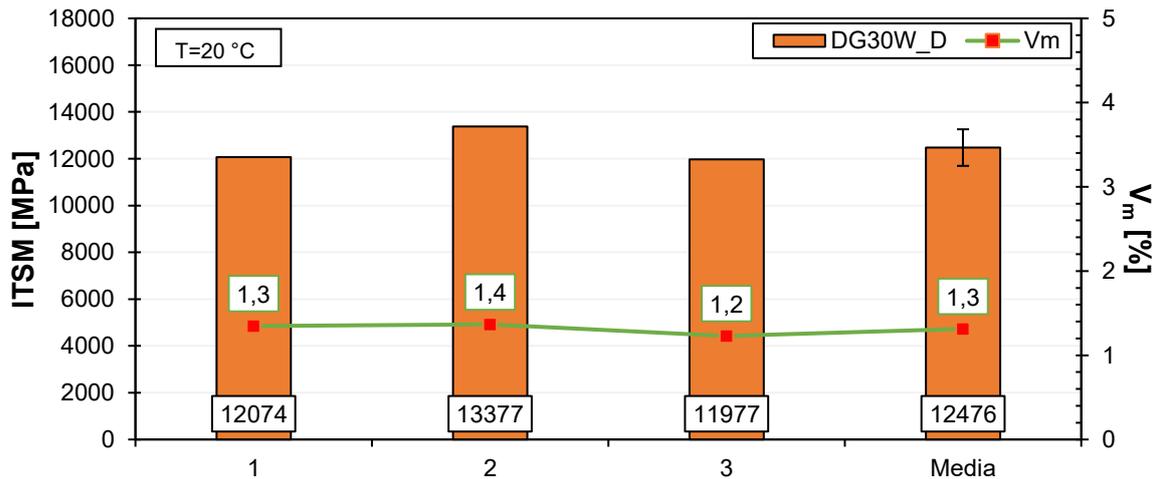


Figura 4.51 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_D”

DG30W_E

In riferimento al grafico ottenuto (Figura 4.52) è possibile affermare come la prova presenti una buona ripetibilità, dato osservabile anche dalla contenuta deviazione standard. È possibile osservare, inoltre, come il modulo elastico sia superiore per provini con minor contenuto di vuoti.

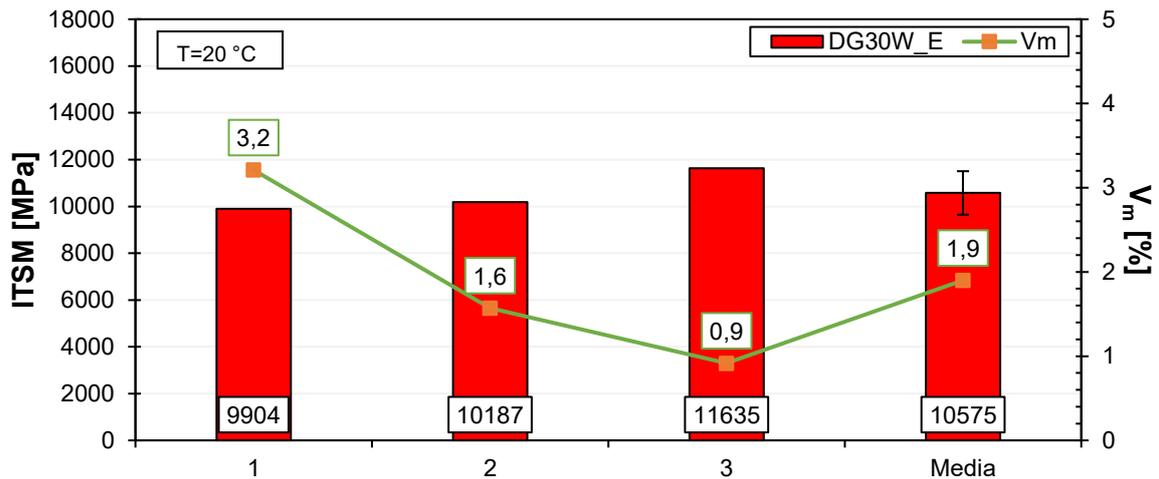


Figura 4.52 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_E”

DG30W_F

Osservando il grafico sotto riportato (Figura 4.53) è possibile affermare che la prova godi di una buona ripetibilità evidenziato anche da una piccola deviazione standard. Si osserva, inoltre, come il modulo elastico sia superiore per provini con minor contenuto di vuoti.

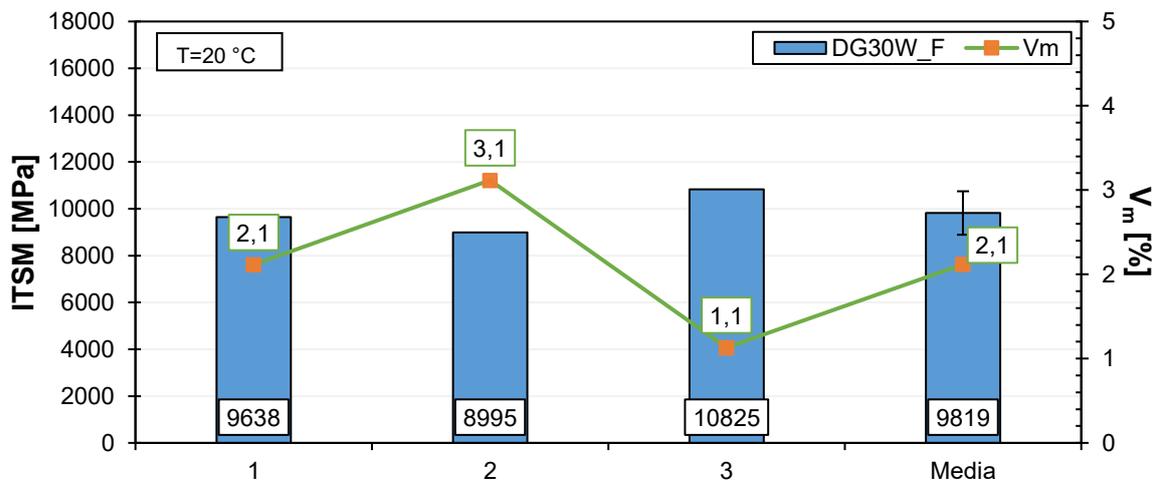


Figura 4.53 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_F”

DG30W_G

In riferimento ai risultati sotto riportati (Figura 4.54) è possibile osservare come la prova presenti una ottima ripetibilità, dato che viene evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard. Si osserva inoltre come il modulo elastico sia superiore per provini con minor contenuto di vuoti.

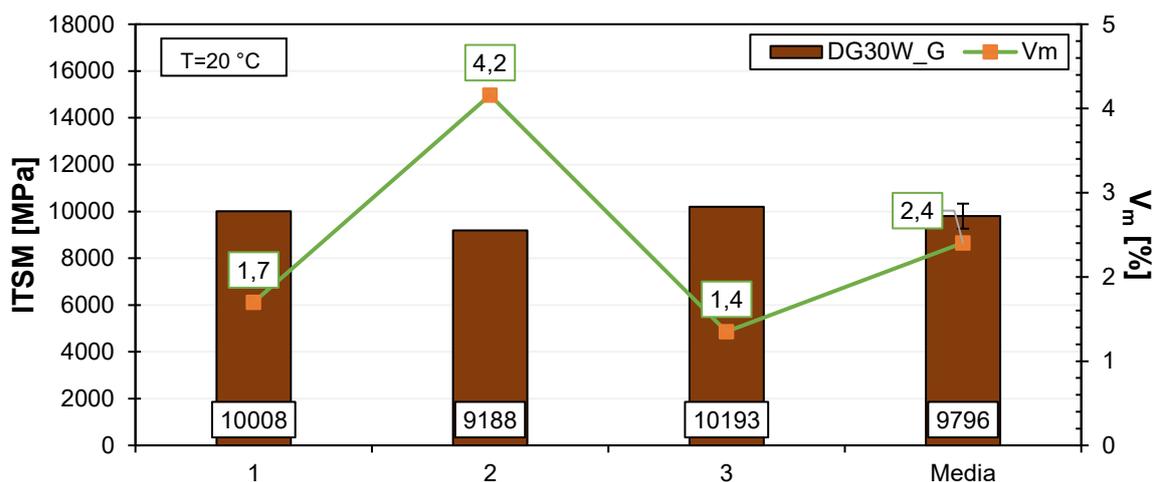


Figura 4.54 risultati prova di modulo a trazione indiretta relativi alla miscela “DG30W_G”

Confronto risultati

Dal confronto dei risultati (Figura 4.55) si evince come il modulo elastico della miscela tradizionale a caldo (DG30H) risulti essere significativamente superiore a tutti gli altri valori misurati per le miscele tiepide. Questo può essere spiegato sia dal maggiore invecchiamento che il bitume vergine subisce a seguito della maggiore temperatura nella fase di miscelazione e compattazione sia dall'ulteriore invecchiamento che subisce il bitume contenuto del fresato nella fase di produzione della miscela. Tutto questo comporta un irrigidimento della miscela finale con conseguente maggiore modulo elastico. Inoltre, analizzando i risultati ottenuti per le miscele tiepide, si osserva come con il dosaggio degli additivi chimici il modulo elastico risulti comunque essere confrontabile con la miscela tiepida di riferimento (DG30W). Anche in questo caso è possibile affermare che la tipologia di additivo chimico dosato influenzi i risultati della prova e dunque le caratteristiche del provino di conglomerato bituminoso confezionato rispetto alla tradizionale tecnologia a caldo HMA.

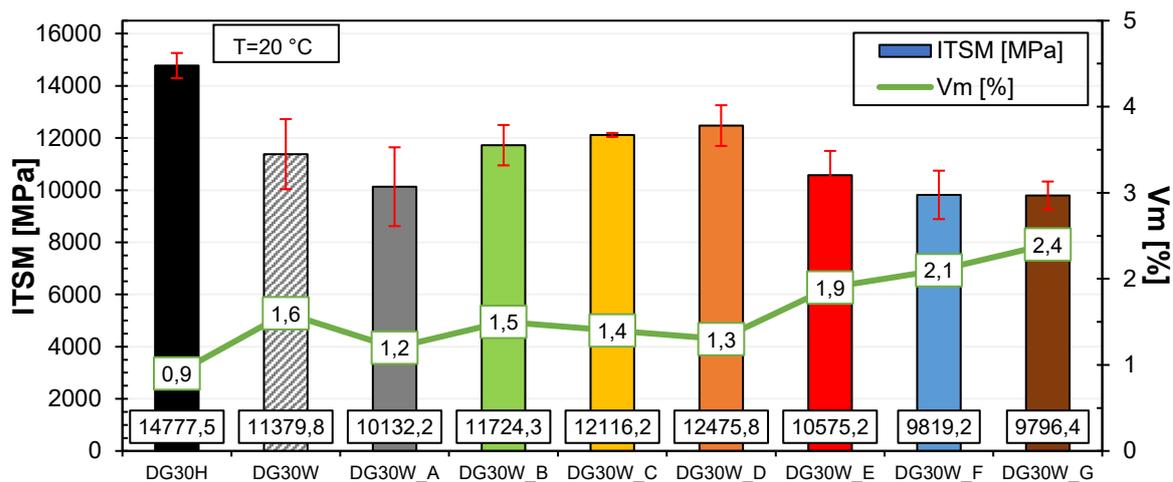


Figura 4.55 confronto dei risultati relativi alla prova di modulo a trazione indiretta

4.2.3 Trazione indiretta

Nel presente paragrafo si riportano i risultati ottenuti dalla prova di trazione indiretta ITT eseguita sui provini confezionati di conglomerato bituminoso. La prova è stata condotta come indicato e normato dalla UNI EN 12697-23 [38] e nelle modalità precedentemente descritte (Cfr. 2.2.2.7). Per ogni miscela si riportano i risultati, in termini di valore ITS e ITC, di ogni provino e, infine, si riporta il confronto tra i valori medi ottenuti.

DG30H

Osservando i risultati sotto riportati (Figura 4.56 e Figura 4.57) è possibile affermare che la prova di trazione indiretta presenti una ottima ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla minima deviazione standard.

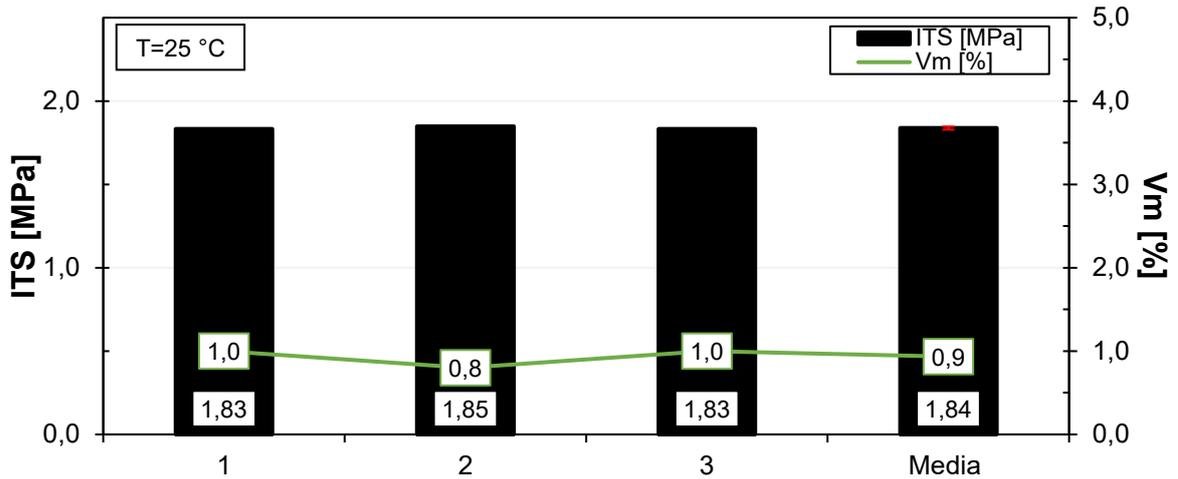


Figura 4.56 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela “DG30H”

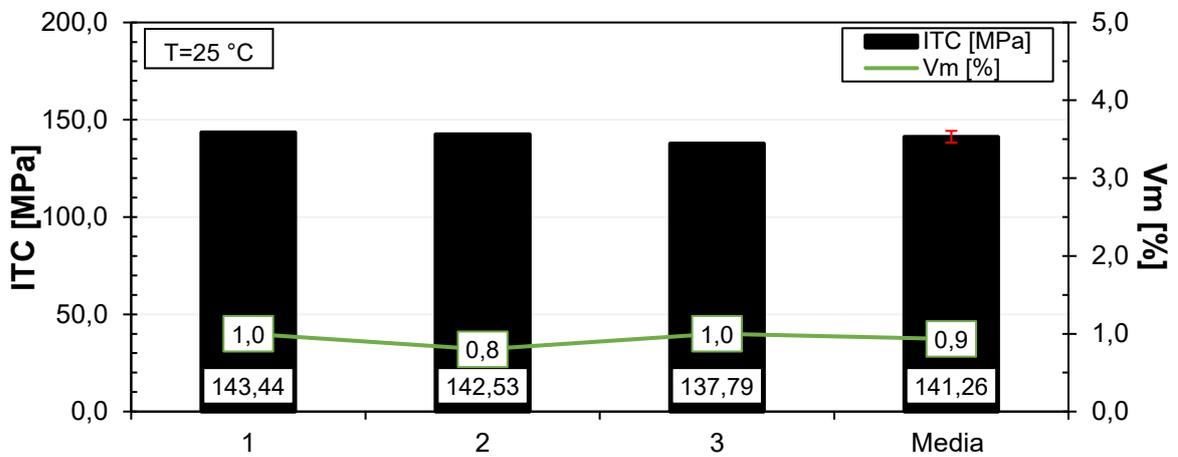


Figura 4.57 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela “DG30H”

DG30W

Analizzando i grafici sotto riportati (Figura 4.58 e Figura 4.59) è possibile affermare che la prova di trazione indiretta presenti una buona ripetibilità, dato evidenziato dalla contenuta deviazione standard. Si osserva, inoltre, come sia il parametro ITS che il parametro ITC decrescano all'aumentare dei vuoti contenuti nel provino testato.

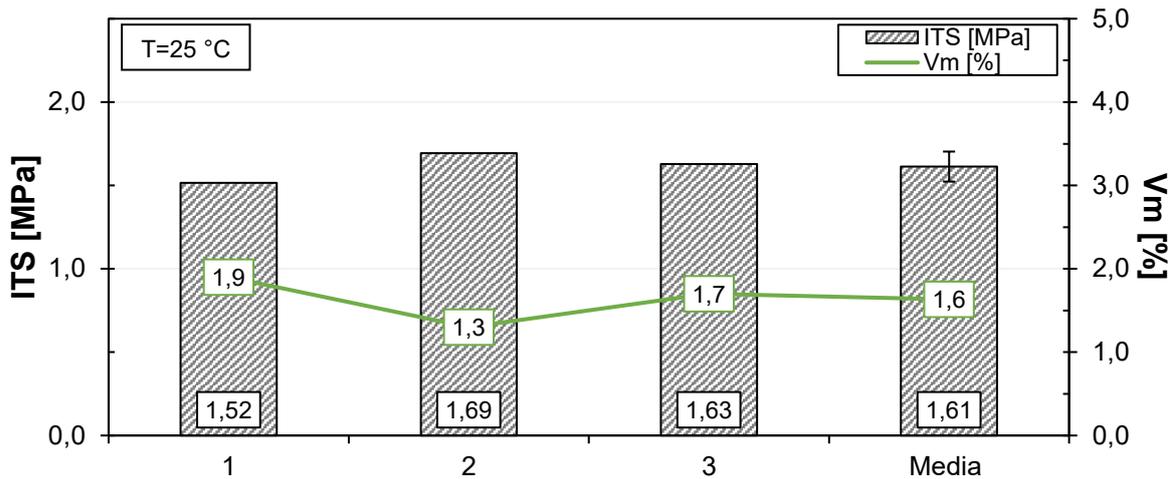


Figura 4.58 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela “DG30W”

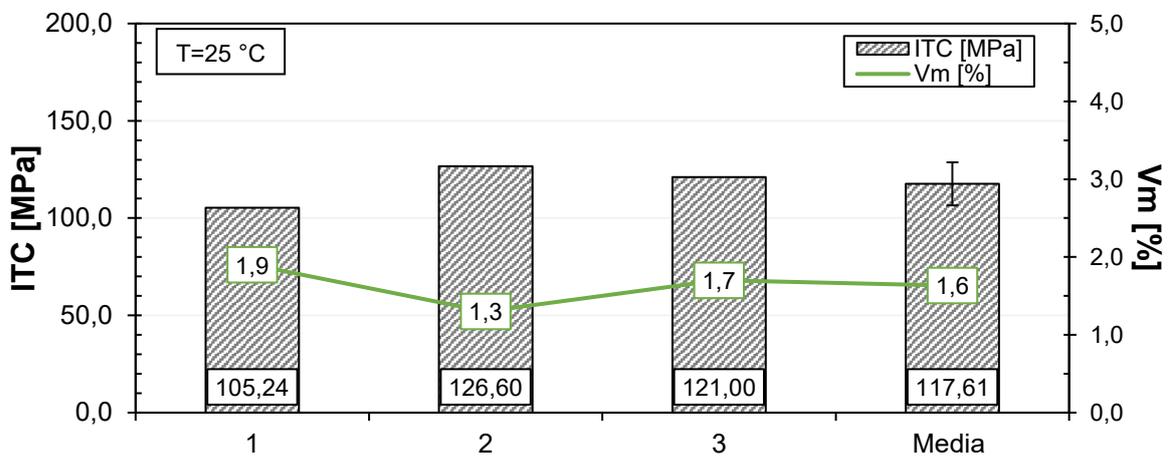


Figura 4.59 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela “DG30W”

DG30W_A

Osservando i risultati sotto riportati (Figura 4.60 e Figura 4.61) è possibile affermare che la prova di trazione indiretta presenti una ottima ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla minima deviazione standard.

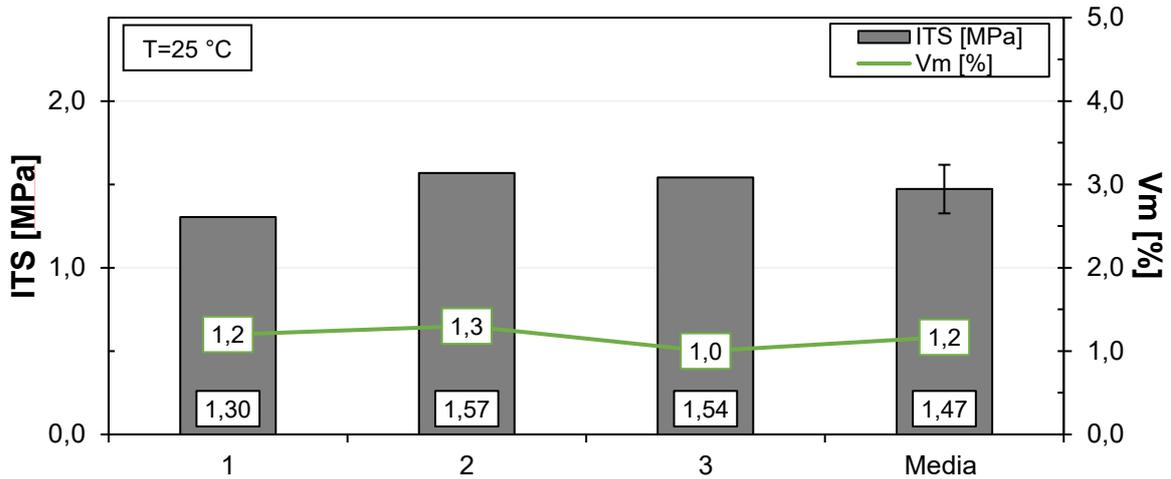


Figura 4.60 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_A"

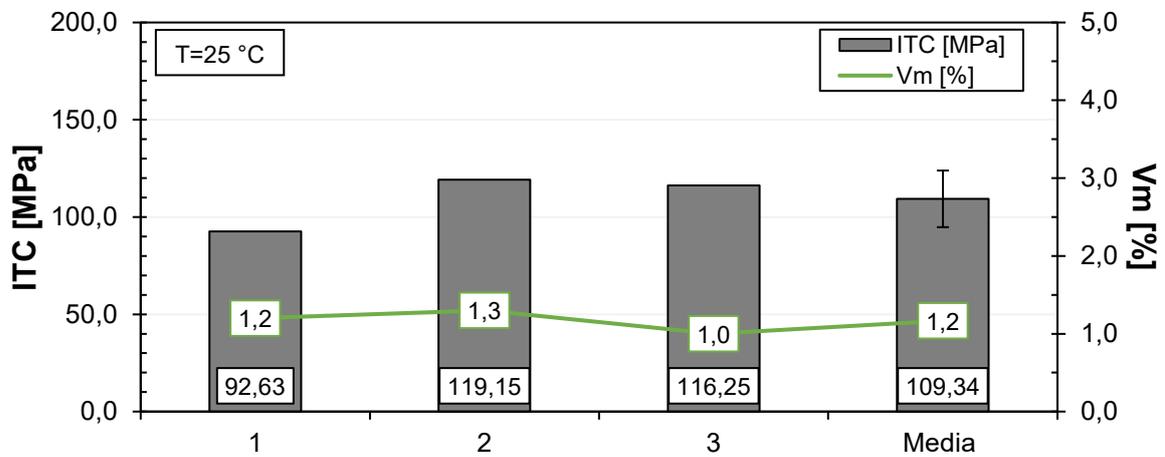


Figura 4.61 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_A"

DG30W_B

Dall'analisi dei grafici sotto riportati (Figura 4.62 e Figura 4.63) si evince come la prova di trazione indiretta presenti una ottima ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla minima deviazione standard presente. Si osserva, inoltre, come sia il parametro ITS che il parametro ITC decrescano all'aumentare dei vuoti contenuti nel provino testato.

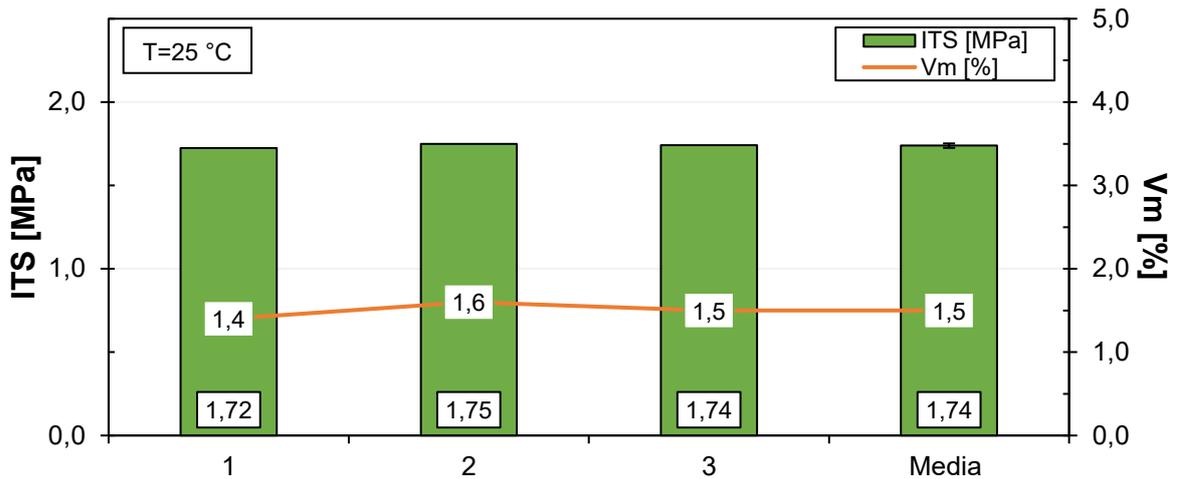


Figura 4.62 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_B"

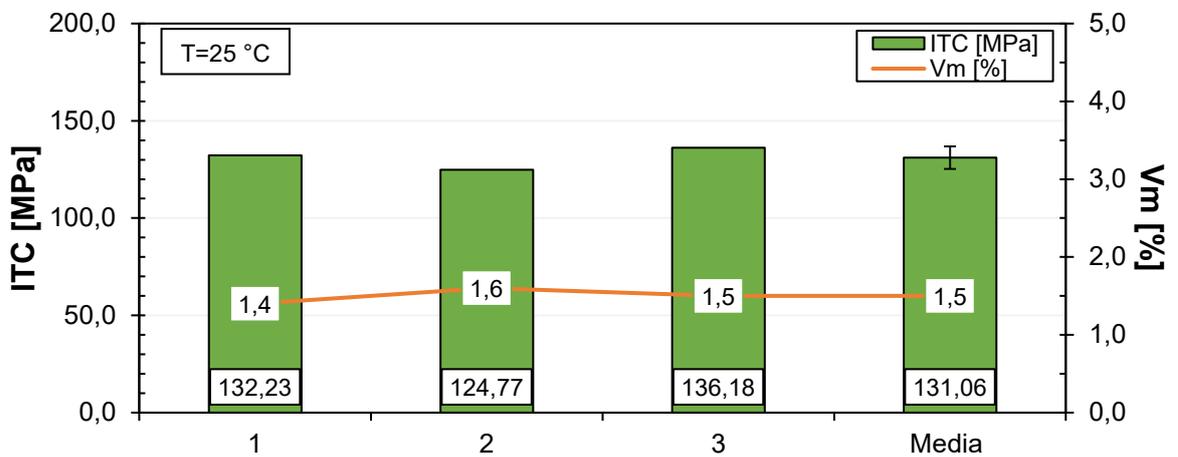


Figura 4.63 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_B"

DG30W_C

Analizzando Figura 4.64 e Figura 4.65 è possibile affermare che la prova di trazione indiretta godi di una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard presente. Si osserva, inoltre, come sia il parametro ITS che il parametro ITC decrescano all'aumentare dei vuoti contenuti nel provino testato.

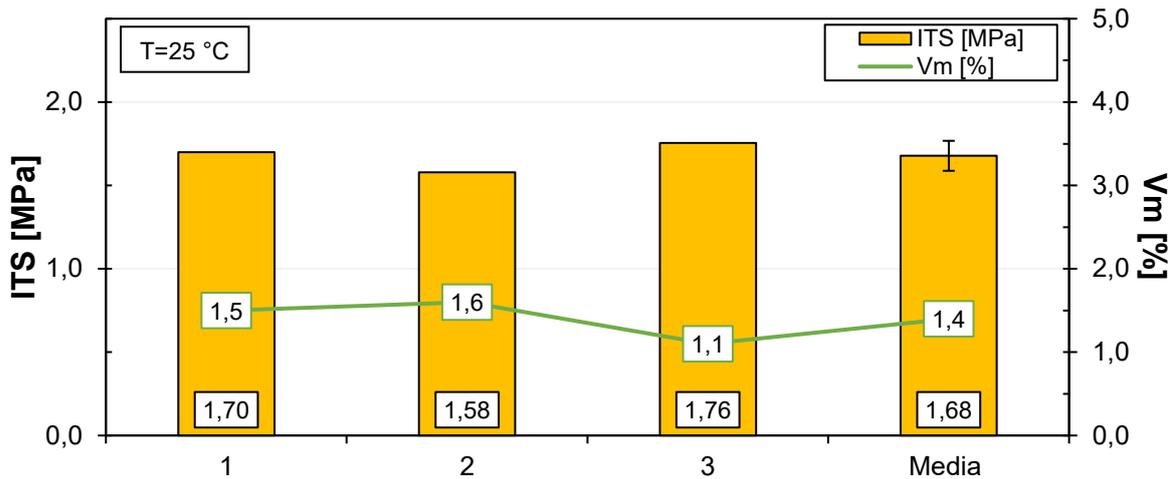


Figura 4.64 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_C"

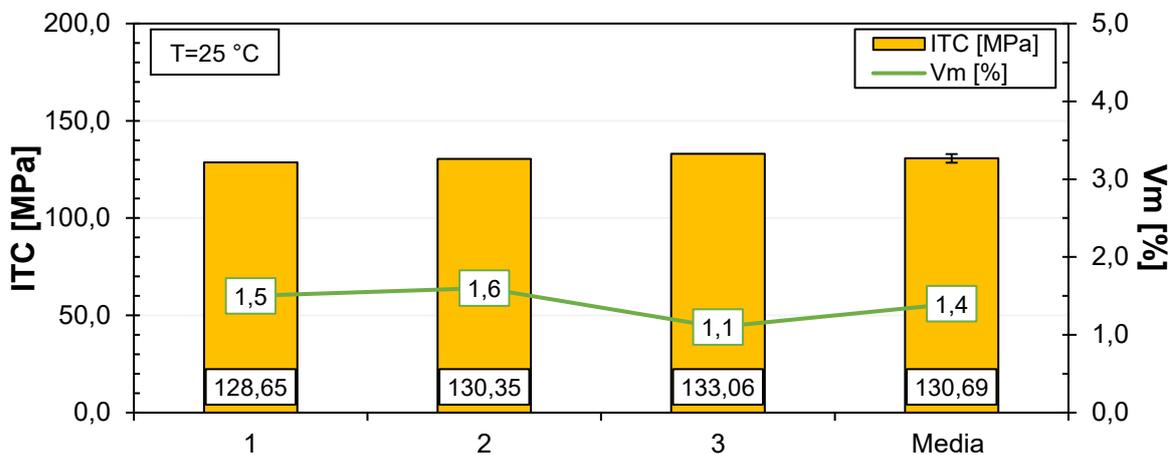


Figura 4.65 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_C"

DG30W_D

Dall'analisi dei grafici sotto riportati (Figura 4.66 e Figura 4.67) si evince come la prova di trazione indiretta presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard presente.

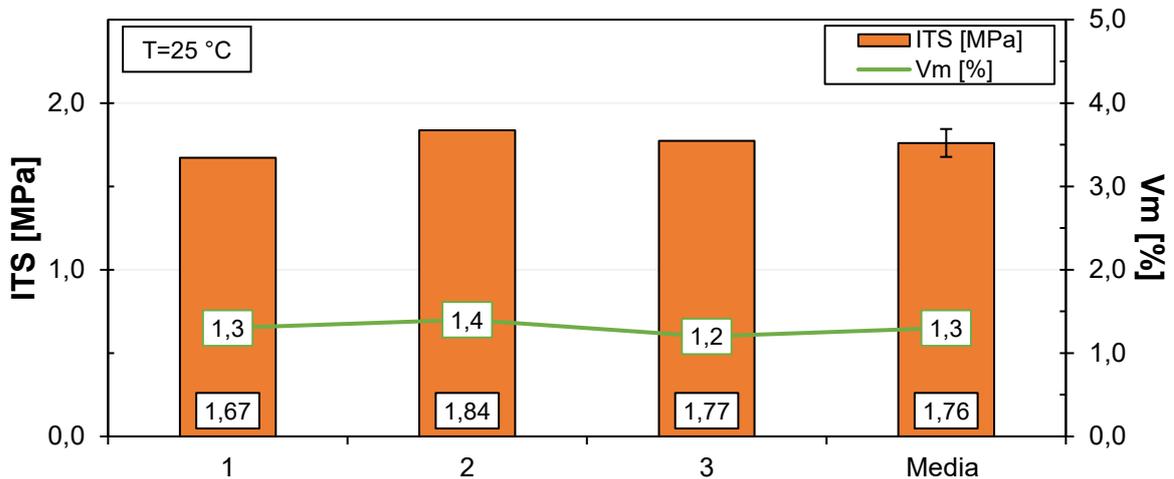


Figura 4.66 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_D"

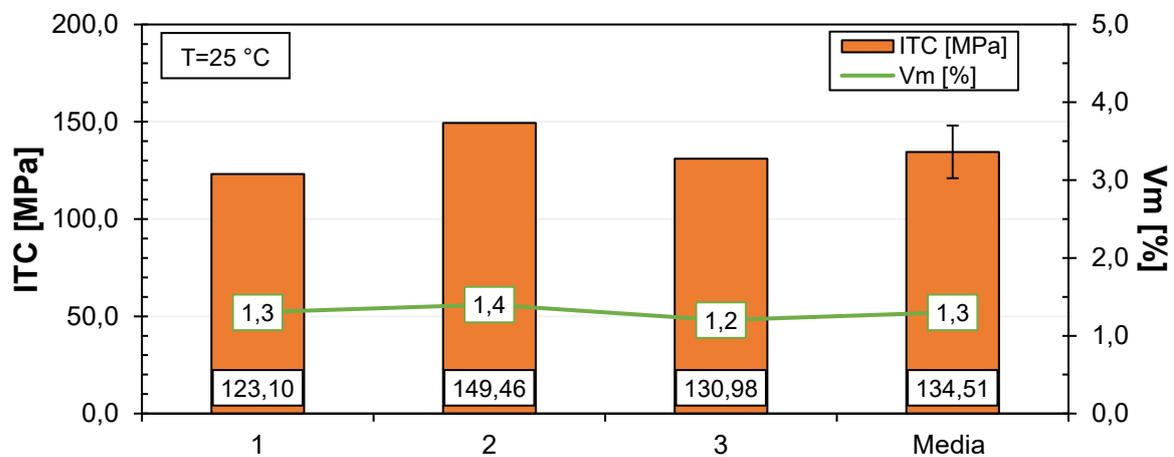


Figura 4.67 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_D"

DG30W_E

Osservando i grafici sotto riportati (Figura 4.68 e Figura 4.69) si evince come la prova di trazione indiretta presenti una buona ripetibilità, dato evidenziato dalla contenuta deviazione standard. Si osserva, inoltre, come sia il parametro ITS che il parametro ITC decrescano all'aumentare dei vuoti contenuti nel provino testato.

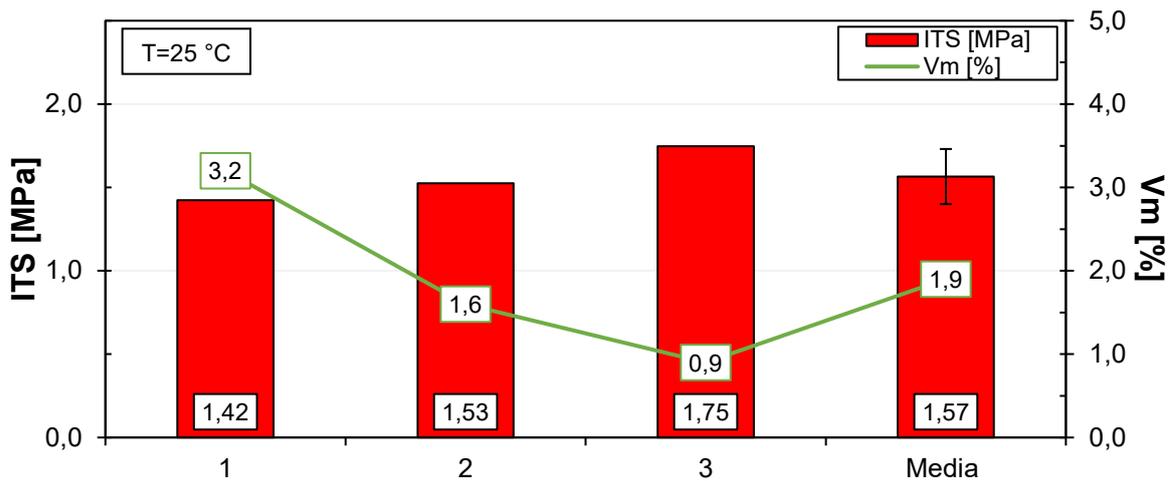


Figura 4.68 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_E"

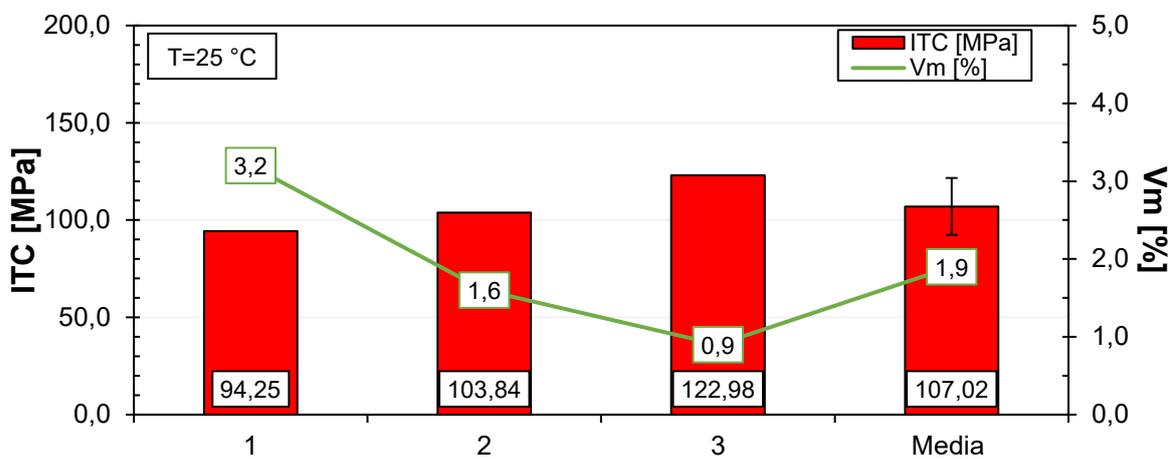


Figura 4.69 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_E"

DG30W_F

Dall'analisi dei grafici sotto riportati (Figura 4.70 e Figura 4.71) è possibile affermare che la prova di trazione indiretta presenti una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard presente. Si osserva, inoltre, come sia il parametro ITS che il parametro ITC decrescano all'aumentare dei vuoti contenuti nel provino testato.

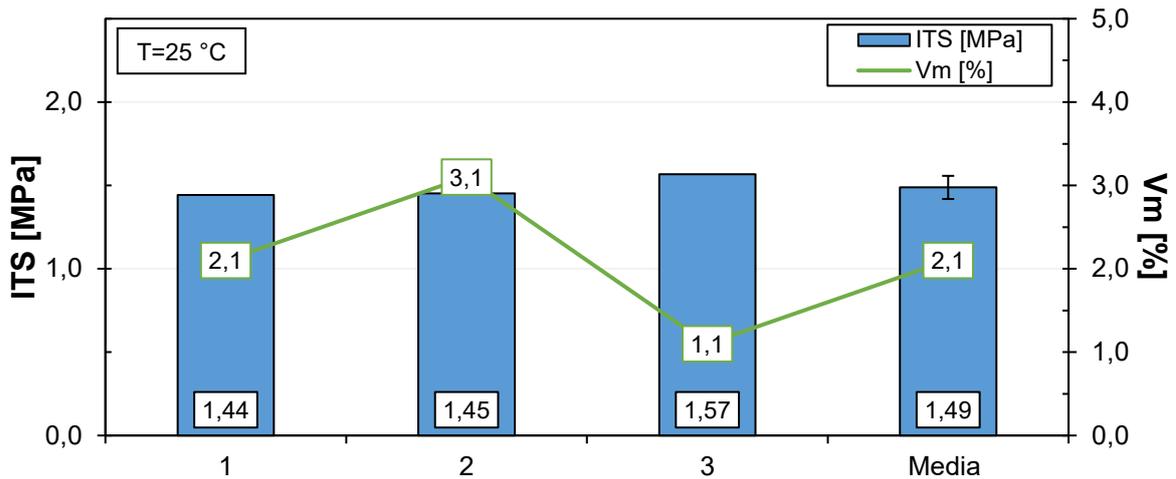


Figura 4.70 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_F"

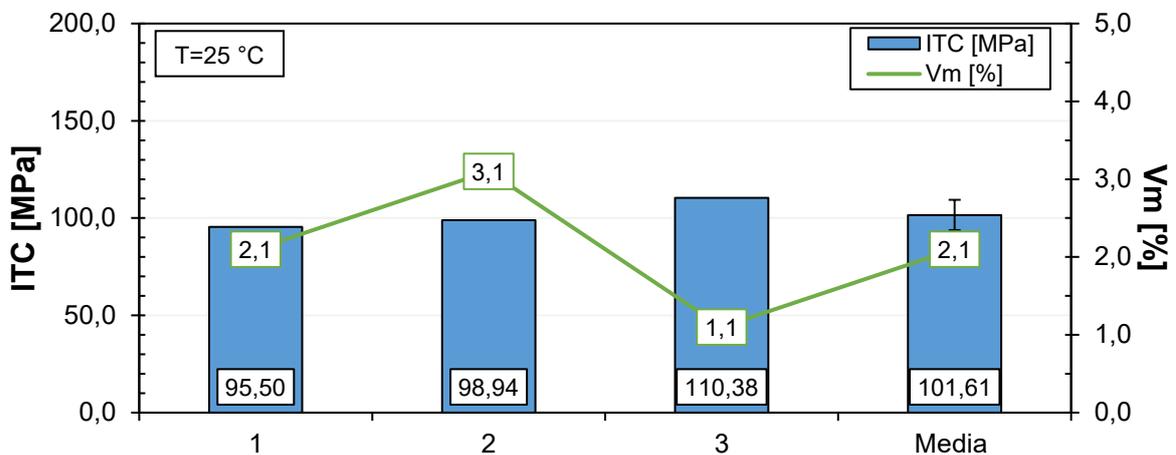


Figura 4.71 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_F"

DG30W_G

Analizzando Figura 4.72 e Figura 4.73 è possibile affermare che la prova di trazione indiretta godi di una buona ripetibilità, aspetto evidenziato anche dalla contenuta deviazione standard presente. Si osserva, inoltre, come sia il parametro ITS che il parametro ITC decrescano all'aumentare dei vuoti contenuti nel provino testato.

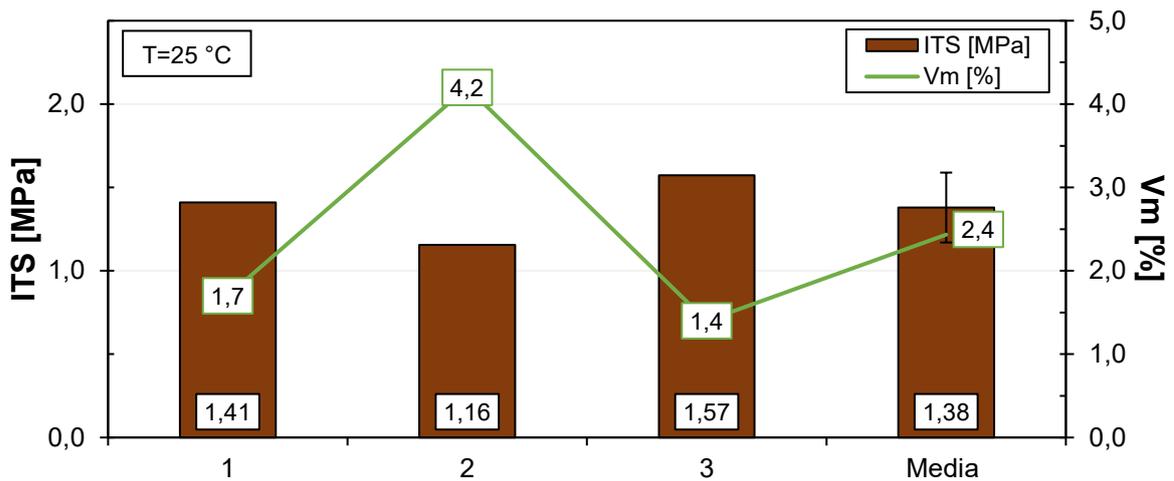


Figura 4.72 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITS per la miscela "DG30W_G"

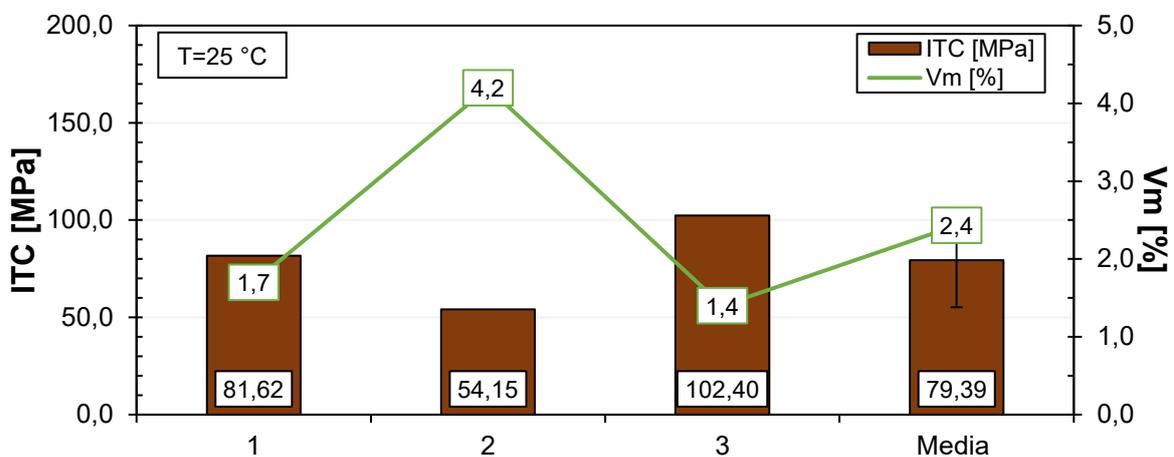


Figura 4.73 risultati della prova di trazione indiretta relativi al parametro ITC per la miscela "DG30W_G"

Confronto risultati

Da figura 4.74 e 4.75 è possibile osservare come tutte le miscele tiepide testate presentino valori di ITS e ITC inferiori rispetto alla miscela calda di riferimento (DG30H) con valori comunque confrontabili per le miscele DG30W_B, DG30W_C e DG30W_D. Invece, per le miscele tiepide DG30W_A, DG30W_B, DG30W_E, DG30W_F e DG30W_G si registrano valori di ITS ed ITC inferiori rispetto alla miscela tiepida di riferimento non additivata (DG30W). Ad eccezione della miscela DG30W_A, la diminuzione della resistenza a trazione indiretta rispetto alla miscela tiepida di riferimento, può essere spiegata, parzialmente, da un maggiore contenuto di vuoti nei provini testati. È possibile notare, inoltre, come tutte le miscele tiepide, con o senza additivo chimico, presentino un contenuto di vuoti superiore a quello della miscela tradizionale a caldo.

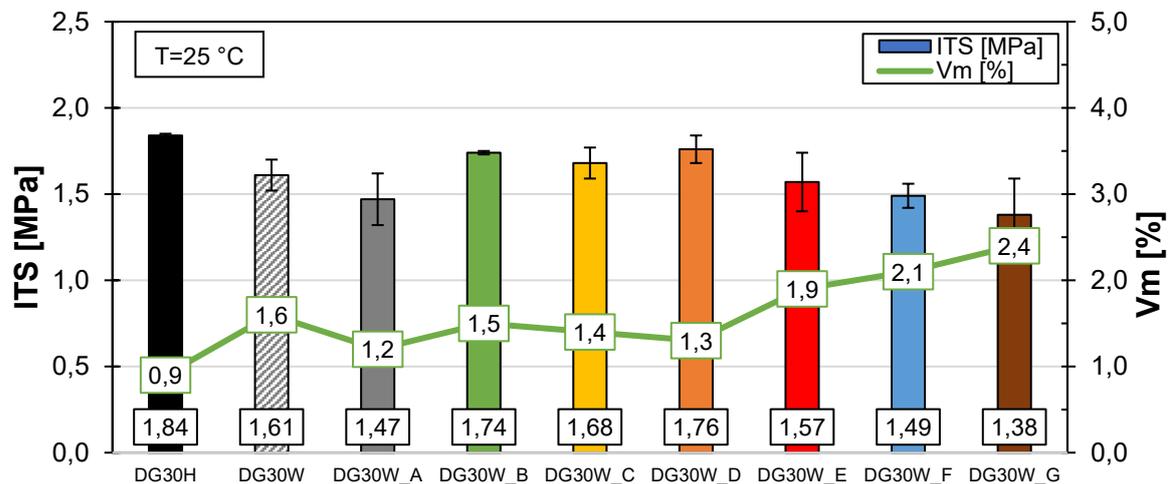


Figura 4.74 confronto dei risultati della prova di trazione indiretta parametro ITS

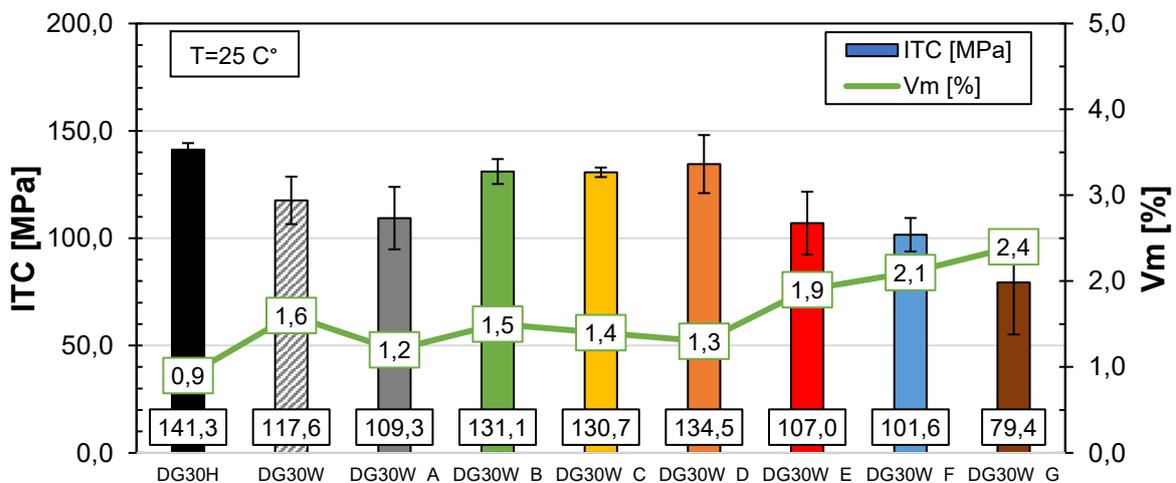


Figura 4.75 confronto dei risultati della prova di trazione indiretta parametro ITC

Capitolo 5: Conclusioni

La presente sperimentazione, condotta presso il Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche, ha avuto come obiettivo la caratterizzazione funzionale di differenti additivi chimici sia dal punto di vista della fase legante, sia dal punto di vista del loro impiego all'interno di miscele bituminose tiepide contenenti fresato per strati di base autostradali. Pertanto, si è proceduto suddividendo la sperimentazione in due fasi distinte: una riguardante il legante (bitume) e l'altra le miscele confezionate. Nella prima fase si è indagata la capacità di modificatore di viscosità degli additivi chimici attraverso prova di viscosità eseguita con viscosimetro rotazionale Brookfield e la loro capacità di riattivante e rigenerante del bitume invecchiato mediante l'analisi dell'adesione bitume-aggregato valutata attraverso prove di Binder Bond Strength (BBS) test. Nella seconda fase, invece, si è proceduto con il confezionamento di nove differenti miscele composte da due miscele di riferimento (una confezionata con la tradizionale tecnica a caldo e una con tecnica tiepida priva di additivo) e sette differenti miscele contenenti i sette additivi chimici usati. Si è proceduto, dunque, andando a determinare le caratteristiche volumetriche (vuoti contenuti) e le caratteristiche di lavorabilità (parametro CEI) di ogni provino concludendo poi con la caratterizzazione meccanica degli stessi attraverso prova di modulo a trazione indiretta (ITSM) e prova di trazione indiretta (ITT).

Alla luce dei risultati emersi da tale sperimentazione e, separando le due fasi che hanno caratterizzato il lavoro, si possono tracciare le seguenti conclusioni:

Fase legante:

- la maggioranza degli additivi chimici impiegati, ad eccezione degli additivi A, E, F non risultano essere dei riduttori di viscosità. Inoltre, l'azione dei riduttori di viscosità persiste a tutte le temperature di prova;
- l'adesione bitume-aggregato, in condizione di bitume vergine, è incrementata solo con alcuni additivi (C, D, E, G) mentre, diminuisce con gli additivi A, B, F. Nella condizione di bitume invecchiato a lungo termine, invece, solo gli additivi B, C, F

hanno garantito un incremento di adesione mentre, per i restanti (A, D, E, G) l'adesione rimane invariata rispetto al PB.

Fase miscele:

- la lavorabilità delle miscele tiepide è fortemente influenzata dalla tipologia di additivo chimico dosato e può, potenzialmente, raggiungere valori confrontabili a quelli delle tradizionali miscele a caldo (additivo B, D) con contenuto di vuoti anch'esso confrontabile;
- la produzione di miscele attraverso la tecnologia tiepida (WMA) comporta provini con minor modulo elastico rispetto a quelli confezionati con la tradizionale tecnica a caldo (HMA), imputabile alle minori temperature di miscelazione e compattazione;
- la resistenza a trazione indiretta delle miscele tiepide è fortemente influenzata dalla tipologia di additivo chimico dosato e può, potenzialmente, raggiungere valori confrontabili a quelli delle tradizionali miscele a caldo (additivo B, D).

Bibliografia

- [1] Kristjansdottir, O. (2006). Warm mix asphalt for cold weather paving (No. WA-RD 650.1). Seattle: University of Washington.
- [2] Hettiarachchi, C., Hou, X., Wang, J., & Xiao, F. (2019). A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. *Construction and Building Materials*, 227, 117096.
- [3] Goh, S.W. and Z. You (2008). “Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Warm Mix asphalt.” GeoCongress 2008, Geosustainability and Geohazard Mitigation, Geotechnical Special Publication (GSP 178), American Society of Civil Engineers, 1000–1007.
- [4] Zaumanis, M., (2010). Warm Mix Asphalt Investigation. *PhD Thesis, Riga Technical University*, Kgs. Lyngby, Denmark
- [5] Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L. T., Yunus, R. B., & Solouki, A. (2014). An overview of the emerging warm mix asphalt technology. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 79-94.
- [6] European Asphalt Pavement Association. (2014). The Use of Warm Mix Asphalt. EAPA position paper-January 2010. www.eapa.org.
- [7] Silva, H. M., Oliveira, J. R., Peralta, J., & Zoorob, S. E. (2010). Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1621-1631.
- [8] Shang, L., Wang, S., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2011). Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(2), 886-891.
- [9] Larsen, O.R., (2001), Warm Asphalt Mix with Foam-WAMFoam. IRF 2001 Partie B: Thèmes Techniques, S.00469. Kolo Veidekke, Norway
- [10] Anderson, R.M., G. Baumgardner, R. May and G. Reinke, (2008), “NCHRP 9-47: engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies.” Interim Report, National Cooperation Highway Research Program, Washington, DC, USA.
- [11] Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L. T., Yunus, R. B., & Solouki, A. (2014). An overview of the emerging warm mix asphalt technology. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 79-94.
- [12] Kakar, M. R., Hamzah, M. O., Akhtar, M. N., & Woodward, D. (2016). Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive. *Journal of cleaner production*, 112, 2342-2353.

- [13] Lu, X., & Isacson, U. (2002). Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building materials*, 16(1), 15-22.
- [14] Huang, B., Shu, X., & Vukosavljevic, D. (2011). Laboratory investigation of cracking resistance of hot-mix asphalt field mixtures containing screened reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(11), 1535-1543.
- [15] Yao, H., You, Z., Li, L., Shi, X., Goh, S. W., Mills-Beale, J., & Wingard, D. (2012). Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay. *Construction and Building Materials*, 35, 159-170.
- [16] Al-Qadi, I. L., Aurangzeb, Q., Carpenter, S. H., Pine, W. J., & Trepanier, J. (2012). Impact of high RAP content on structural and performance properties of asphalt mixtures. *Illinois Center for Transportation*, 0197-9191.
- [17] McDaniel, R., Shah, A., Huber, G., & Gallivan, V. (2007). Investigation of properties of plant-produced RAP mixtures. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 103-111.
- [18] Morea, F., Marcozzi, R., & Castaño, G. (2012). Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in Warm Mix Asphalts (WMAs). *Construction and Building Materials*, 29, 135-141.
- [19] Ragni, D., Ferrotti, G., Lu, X., & Canestrari, F. (2018). Effect of temperature and chemical additives on the short-term ageing of polymer modified bitumen for WMA. *Materials & Design*, 160, 514-526.
- [20] Remišová, E., & Holý, M. (2017, October). Changes of properties of bitumen binders by additives application. In IOP conference series: *Materials science and engineering* (Vol. 245, No. 3, p. 032003). IOP Publishing.
- [21] Oliviero Rossi, C., Teltayev, B., & Angelico, R. (2017). Adhesion promoters in bituminous road materials: A review. *Applied Sciences*, 7(5), 524.
- [22] Mo, L., Li, X., Fang, X., Huurman, M., & Wu, S. (2012). Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives. *Construction and Building Materials*, 37, 239-247.
- [23] Yousefi, A., Behnood, A., Nowruzzi, A., & Haghshenas, H. (2021). Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 268, 121200.
- [24] Zaltuom, A. M. (2018). A review study of the effect of air voids on asphalt pavement life.
- [25] Scherocman, J. A. (1984). Guidelines for compacting asphalt concrete pavement. *Better Roads*, 54(3).

- [26] Rathore, M., Haritonovs, V., & Zaumanis, M. (2021). Performance evaluation of warm asphalt mixtures containing chemical additive and effect of incorporating high reclaimed asphalt content. *Materials*, 14(14), 3793.
- [27] Farooq, M. A., Mir, M. S., & Sharma, A. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 168, 61-72.
- [28] Xiao, F., Punith, V. S., & Amirkhanian, S. N. (2012). Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures. *Fuel*, 94, 144-155.
- [29] UNI EN 13302 Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione della viscosità dei leganti bituminosi attraverso l'uso del viscosimetro rotazionale
- [30] AASHTO T 361-16 Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test
- [31] UNI EN 12607-1 Bitume e leganti bituminosi – Determinazione della resistenza all'indurimento per effetto del calore e dell'aria – Parte 1: Metodo RTFOT
- [32] UNI EN 14769 Bitume e leganti bituminosi – Invecchiamento, condizionamento accelerato a lungo termine mediante l'utilizzo di un recipiente di invecchiamento pressurizzato (PAV)
- [33] UNI-EN 12697-31 Miscele bituminose - Metodi di prova – Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria
- [34] UNI EN 12697-8 Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi
- [35] UNI EN 12697-5 Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 5: Determinazione della massa volumica massima
- [36] UNI EN 12697-6 Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi
- [37] UNI EN 12687-26 Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 26: Rigidezza
- [38] UNI EN 12697-23 Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi