



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura
Area Strade

**STUDIO DELLA VISCOSITÀ DI BITUMI CON NUOVI
AGENTI MODIFICANTI**

Study of the viscosity of bitumen with new modifying agents

Relatore:
Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:
Ing. Emiliano Prospero

Tesi di Laurea di:
Alex Di Luca

Anno Accademico 2020/2021

Alla mia famiglia

INDICE

INTRODUZIONE.....	5
CAPITOLO 1 - STATO DELL'ARTE	7
1.1 IL BITUME.....	7
1.2 AGENTI MODIFICANTI	11
CAPITOLO 2 - INDAGINE SPERIMENTALE	13
2.1 MATERIALI.....	13
2.1.1 IL GRAFENE.....	13
2.1.2 IL CARBON BLACK.....	19
2.2 APPARECCHIATURE DI PROVA	23
2.2.1 ROTOVISCOSIMETRO BROOKFIELD.....	23
2.2.2 METODI DI INVECCHIAMENTO: RTFOT e PAV.....	31
CAPITOLO 3 - RISULTATI SPERIMENTALI.....	37
3.1 BITUME DI RIFERIMENTO.....	37
3.1.1 BITUME DI RIFERIMENTO NO AGED	37
3.1.2 BITUME DI RIFERIMENTO RTFOT	38
3.1.3 BITUME DI RIFERIMENTO PAV	39
3.1.4 GRAFICO RIEPILOGATIVO	40
3.2 BITUME COMPOUND A.....	41
3.2.1 BITUME COMPOUND A NO AGE	41
3.2.1.1 BITUME COMPOUND A 1,5% NO AGE	41
3.2.1.2 BITUME COMPOUND A 2,0% NO AGE	42
3.2.1.3 BITUME COMPOUND A 3,0% NO AGE	43
3.2.1.4 BITUME COMPOUND A 5,0% NO AGE	44
3.2.1.5 GRAFICO RIEPILOGATIVO	45
3.2.2 BITUME COMPOUND A RTFOT	46
3.2.2.1 BITUME COMPOUND A 1,5% RTFOT.....	46
3.2.2.2 BITUME COMPOUND A 2,0% RTFOT.....	47
3.2.2.3 BITUME COMPOUND A 3,0% RTFOT.....	48
3.2.2.4 BITUME COMPOUND A 5,0% RTFOT.....	49
3.2.2.5 GRAFICO RIEPILOGATIVO	50
3.2.3 BITUME COMPOUND A PAV	51
3.2.3.1 BITUME COMPOUND A 1,5% PAV.....	51
3.2.3.2 BITUME COMPOUND A 2,0% PAV.....	52
3.2.3.3 BITUME COMPOUND A 3,0% PAV.....	53

3.2.3.4 BITUME COMPOUND A 5,0% PAV.....	54
3.2.3.5 GRAFICO RIEPILOGATIVO.....	55
3.3 BITUME COMPOUND B.....	56
3.3.1 BITUME COMPOUND B NO AGE.....	56
3.3.1.1. BITUME COMPOUND B 0,02% NO AGE.....	56
3.3.1.2 BITUME COMPOUND B 0,10% NO AGE.....	57
3.3.1.3 BITUME COMPOUND B 1,00% NO AGE.....	58
3.3.1.4 GRAFICI DI RIEPILOGO.....	59
3.3.2 BITUME COMPOUND B RTFOT.....	60
3.3.2.1 BITUME COMPOUND B 0,02% RTFOT.....	60
3.3.2.2 BITUME COMPOUND B 0,10% RTFOT.....	61
3.3.2.3 GRAFICI DI RIEPILOGO.....	62
3.3.3 BITUME COMPOUND B PAV.....	63
3.3.3.1 BITUME COMPOUND B 0,02% PAV.....	63
3.3.3.2 BITUME COMPOUND B 0,10% PAV.....	64
3.3.3.3 GRAFICI DI RIEPILOGO.....	65
3.4 GRAFICI DI RIEPILOGO PER TUTTI I BITUMI NO AGE.....	66
3.5 GRAFICI RI RIEPILOGO PER TUTTI I BITUMI INVECCHIATI CON RTFOT.....	67
3.5 GRAFICI DI RIEPILOGO PER TUTTI I BITUMI INVECCHIATI CON PAV.....	68
CAPITOLO 3.6 - OSSERVAZIONI.....	69
CAPITOLO 4 - CONCLUSIONI.....	73
BIBLIOGRAFIA.....	75

INTRODUZIONE

Lo scopo della seguente indagine sperimentale è quello di studiare la viscosità di nuovi bitumi modificati con grafene e carbon black per un eventuale immissione sul mercato. La valutazione e il monitoraggio della viscosità alle varie temperature è essenziale per conoscere al meglio il comportamento del bitume in sito, ma anche per conoscere i costi di produzione del conglomerato bituminoso. Sappiamo infatti che per produrre il conglomerato bituminoso, che è un impasto di bitume ed aggregati, occorre riscaldare precedentemente il bitume per far sì che esso acquisti una consistenza sufficientemente fluida per essere miscelato con gli inerti. Solitamente la produzione di conglomerati bituminosi impastati con bitumi modificati richiede il raggiungimento di temperature maggiori (circa 170 °C) per far sì che ci sia una sufficiente perdita di viscosità del bitume. Ovviamente più il bitume è viscoso e maggiori saranno i costi per il riscaldamento di quest'ultimo. Si può avere il caso in cui pur raggiungendo temperature molto elevate non si riesca a garantire la realizzazione di un conglomerato a regola d'arte. Viceversa, bitumi poco viscosi potrebbero creare problemi in ambienti con climi torridi, inducendo una perdita di rigidità del conglomerato bituminoso. Lo studio della viscosità di questi nuovi bitumi verrà fatta mediante l'utilizzo del Roto-viscosimetro Brookfield, uno strumento in grado di valutare la viscosità di una piccola porzione di bitume a diverse temperature. Questi dati verranno poi registrati, tabellati e confrontati tra di essi per individuarne eventuali correlazioni. L'obiettivo sicuramente è quello di capire se questi bitumi hanno buona proprietà a temperatura ambiente e quali sono le temperature da raggiungere per la posa in opera. Sempre più negli ultimi anni si sta cercando di trovare soluzioni alternative a quelle tradizionali che ci permettano di rispettare l'ambiente, riducendo il quantitativo di rifiuti prodotti, le emissioni di anidride carbonica, di materie prime preziose in esaurimento. Altre motivazioni che ci spingono a creare nuovi materiali per la costruzione di pavimentazioni stradali sono anche i costi per la loro realizzazione e i tempi dovuti alla loro manutenzione. Sappiamo benissimo come al giorno d'oggi il tempo sia denaro, e che generare traffico con

interventi di manutenzione apporta un costo all'intera società, in particolare a corrieri, ai mezzi pubblici, tassisti, camionisti e artigiani. Pertanto, è necessario incrementare la durabilità delle pavimentazioni stradali limitando:

- Interventi di nuova realizzazione (consumo di materie prime non rinnovabili e in via di esaurimento)
- Interventi di manutenzione
- Emissione di anidride carbonica ,fumi e sostanze nocive nell'atmosfera
- Generazione di traffico

Si vuole pertanto valutare la possibilità di inserimento di grafene e carbon black al fine su raggiungere i precedenti obiettivi e quindi ottenere conglomerati bituminosi estremamente durevoli. Con il seguente studio sperimentale ne andremo a valutare la viscosità alle varie temperature.

CAPITOLO 1 - STATO DELL'ARTE

1.1 IL BITUME

Il bitume è stato il primo prodotto petrolifero utilizzato dall'uomo per mezzo delle sue proprietà. I primi impieghi del bitume da parte dell'uomo risalirebbero addirittura al medio paleolitico, ovvero 42000 anni fa. Anticamente il bitume era infatti reperibile in natura, nelle pozze ove affiorava il petrolio di giacimenti superficiali, e perlopiù in medio oriente; solo col tempo, quello "a portata di mano" si è esaurito, e si è cominciato a cercarlo più in profondità. L'uomo ha imparato ben presto ad utilizzare a proprio vantaggio le particolari caratteristiche di questa insolita materia nera, che fu perfino utilizzata come una medicina e spalmata sulla pelle per curarne alcune malattie, o come arma, combinato con lo zolfo nel famigerato "Fuoco Greco" tanto usato dai Bizantini. Ma gli usi più comuni e noti erano ovviamente altri, la presenza del bitume come legante tra un mattone e l'altro, ad esempio, caratterizza le imponenti costruzioni mesopotamiche di Ur, Lagash e Babilonia, ma anche alcune egizie di Tebe; costruzioni spesso magnificamente conservate e che risalgono fino a 6.000 anni addietro. Risultando particolarmente tenace e duraturo come adesivo, era impiegato anche per incollare a mura e palazzi decorazioni in maiolica o pietre. Furono proprio gli egizi a battezzare il misto di rocce e bitume con il nome di "asphaltos" (1).



Figura 1 "Bitume naturale affiorante in superficie"

Il bitume è un composto organico e può essere disponibile in forma naturale oppure ottenuto artificialmente:

- I bitumi naturali sono molto diffusi sulla crosta terrestre. Costituiscono in qualche caso il materiale impregnante di molte rocce di tipo sedimentario (arenarie e calcari, e in questo caso si parla di asfalti naturali), oppure si presentano sotto forma di vene o sacche nel sottosuolo o come affioramenti superficiali di estensione variabile, veri e propri laghi alimentati da vene sotterranee [Figura 1]. I bitumi naturali si trovano soprattutto in Canada, a Trinidad, nel Venezuela, in Messico, a Cuba, nel Colorado e in svariati altri paesi.
- I bitumi artificiali o bitumi di petrolio possono sostituire egregiamente quelli naturali anche se presentano rispetto a questi ultimi una minore stabilità a causa di una minore percentuale di asfalteni. Si ottengono dalla distillazione del greggio [Figura 2] ed è il primo prodotto generato da quest'ultima, pertanto quello meno raffinato. Il bitume di natura industriale è quello prevalentemente utilizzato e le sue proprietà variano a seconda delle qualità del grezzo di partenza e processo di produzione utilizzato. Proprio per tale motivo i bitumi non vengono classificati in base alla loro composizione chimica, ma in relazione alle prestazioni che esso è in grado di garantire (aspetto fisico) (II).

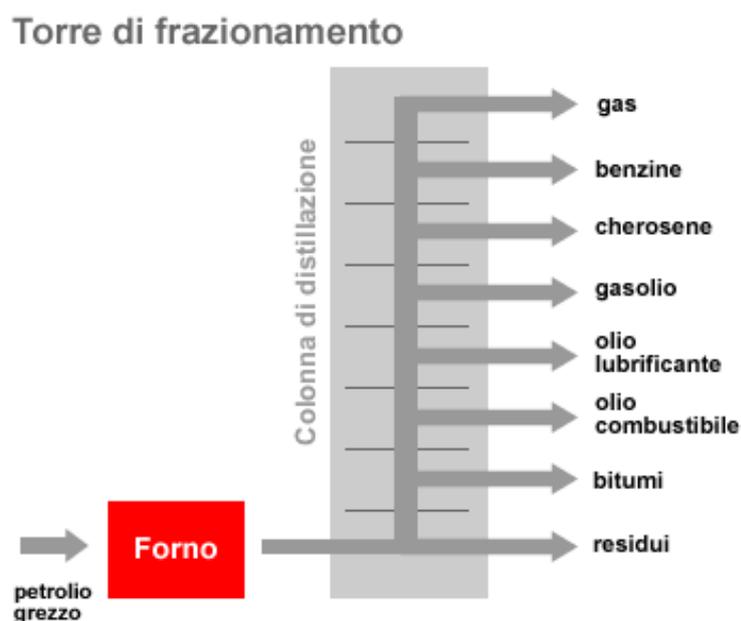


Figura 2 "Colonna di distillazione del petrolio grezzo con relativi risultati di lavorazione"

Generalmente il bitume è costituito da una percentuale in peso di carbonio e di idrogeno intorno all'80% e al 10%. Generalmente si ritiene che non possano esistere due bitumi chimicamente identici per i motivi precedentemente espliciti. Tramite solubilizzazione frazionata, precipitazione e tecniche cromatografiche è possibile separare un bitume in 4 classi di composti (le cosiddette frazioni SARA):

- Saturi
- Aromatici
- Resine
- Asfaltini

Generalmente il bitume può essere visto come una emulsione in cui micelle di asfaltini circondati da resine e aromatici sono disperse in una fase fluida di idrocarburi saturi. Il contenuto di zolfo, ossigeno e azoto è assai variabile: lo zolfo, ad esempio, a seconda della provenienza, può variare dal 1% al 10%(III). Il contatto con ossigeno presente nell'aria e la prolungata esposizione agli agenti atmosferici (sbalzi termici, ecc.) genera nel bitume un invecchiamento con decadimento delle sue proprietà. Questo processo consiste essenzialmente in una ossidazione dei componenti oleosi e delle resine asfaltiche; si ha così un aumento del tenore di asfaltini ed il bitume indurisce, perdendo elasticità. In generale, è non volatile a temperatura ambiente, insolubile in acqua e solubile in alcuni solventi, generalmente di colore bruno o nerastro.



Figura 3 “Conglomerato bituminoso”

Il bitume al giorno d'oggi ha trovato ampio sfogo nella realizzazione e manutenzione di pavimentazioni stradali in quanto costituisce un ottimo legante da utilizzare per miscelazione di aggregati e realizzazione di impasti. Esso, miscelato con grani lapidei ed altri additivi, ci permette di ottenere un conglomerato bituminoso [Figura 3].

Questo principale composto utilizzato per realizzazione pavimentazioni stradali resistenti ad usura, con una buona capacità portante, estremamente compatte e molto durevoli. Il bitume, nella fattispecie, può anche essere impiegato in un'ampia varietà di applicazioni industriali dove sono richieste caratteristiche di resistenza all'acqua e adesione, come la preparazione di membrane impermeabilizzanti. Tra le tante caratteristiche del bitume abbiamo anche la correlazione che c'è tra temperatura e consistenza. Questo è un aspetto molto importante che può influenzare di molto sia i costi di realizzazione della pavimentazione, ma anche le sue prestazioni in un determinato ambiente con una certa temperatura. A temperatura ambiente la consistenza del bitume è quella di un solido o semisolido, mentre a temperature elevate si ha un progressivo rammollimento, ed infine a temperature basse si ha un infragilimento.

Il bitume inoltre è un materiale viscoelastico, ossia il suo comportamento meccanico è molto sensibile alla velocità di applicazione dei carichi. Infatti, se sottoposto a brevi tempi di carico, si ha una deformazione di tipo prevalentemente elastico. Al contrario, se è soggetto a lunghi tempi di carico, tende a comportarsi come un fluido viscoso e si originano deformazioni irreversibili.

Come abbiamo già accennato i bitumi si caratterizzano in base alle loro prestazioni meccaniche e caratteristiche fisiche. In particolar modo i parametri che solitamente vengono studiati per fare una classificazione di bitumi sono:

- Resistenza alla penetrazione.
- Studio del punto di rammollimento, o meglio un particolare stato termodinamico in corrispondenza del quale un materiale comincia a modificare il proprio stato di aggregazione da solido a fluido.
- Studio del punto di rottura, ossia la temperatura alla quale il bitume solido o semisolido, raffreddato progressivamente, raggiunge un determinato

grado di fragilità misurato in modo convenzionale mediante un'apposita apparecchiatura.

1.2 AGENTI MODIFICANTI

Tra le varie tipologie di bitumi che possiamo trovare sul mercato ci sono anche i bitumi modificati. Alcuni di questi sono bitumi modificati con polimeri ormai molto diffusi in tutto il contesto internazionale, ma anche “bitumi multigrade”, bitumi duri, bitumi addizionati con acido ortofosforico, bitumi con polverino di gomma, bitumi anti-cherosene, bitumi albini (senza asfaltini) e bitumi pigmentati.



Figura 4 "Tipico impianto per la produzione di bitume modificato"

Questi bitumi modificati vengono ottenuti dall'unione di bitume tradizionale con particolari composti chimici, detti agenti modificanti, solitamente di natura polimerica. Il bitume modificato risulterà molto differente da quello originale in quanto l'agente modificante altererà le caratteristiche chimico-fisiche del prodotto. Ciò viene fatto per migliorare le caratteristiche prestazionali, per salvaguardare l'ambiente, per ridurre in alcuni casi i costi e migliorare le condizioni di posa in opera del materiale (minori fumi e sostanze tossiche). Le tecniche di realizzazione del bitume variano a seconda dell'agente modificante che andiamo ad utilizzare, al fine di realizzare un prodotto dalle caratteristiche omogenee e controllate. Nella maggior parte dei casi viene realizzato un composto di base con un'elevata concentrazione di agente modificante che viene successivamente diluito con del bitume tradizionale. È di rilevante importanza in questi casi dedicare particolare attenzione al metodo di stoccaggio che solitamente avviene conservando il composto in serbatoi termici mantenuti ad

una certa temperatura ed in continua miscelazione in modo da impedire la segregazione dell'agente modificante e separazione di fasi.

CAPITOLO 2 - INDAGINE SPERIMENTALE

Lo studio sperimentale condotto ha avuto come obiettivo quello di valutare la viscosità di bitumi modificati e non, al fine di determinare le temperature da utilizzare per la miscelazione del bitume con gli aggregati. Per farlo sono state studiate 2 diverse tipologie di bitumi modificati chiamati Compound A e Compound B, e poi confrontati con un bitume di riferimento.

I bitumi modificati sono stati studiati con diverse percentuali di agente modificante a seconda della tipologia. Tutti i bitumi sono stati analizzati in 3 stati: vergine (non invecchiato), invecchiato a breve termine (utilizzando l'apparecchiatura RTFOT), invecchiato a lungo termine (utilizzando l'apparecchiatura PAV).

Si è deciso di studiare questi bitumi invecchiati anche per valutarne la loro viscosità in caso di riciclo a caldo.

Le temperature a cui sono stati registrati i dati sono 60,80,100,120,140,160 e 180°C.

2.1 MATERIALI

Per la sperimentazione sono stati utilizzati bitumi non invecchiati, bitumi invecchiati a breve termine e bitumi invecchiati a lungo termine. Questi bitumi si dividono in bitumi modificati (COMPOUND A, COMPOUND B) e bitumi non modificati (BITUME DI RIFERIMENTO). Ogni bitume modificato è stato fornito con diverse percentuali di agente modificante in modo da individuare eventuali correlazioni ed osservazioni empiriche. Nella fattispecie gli agenti modificanti che sono stati utilizzati per realizzare questi bitumi sono il grafene e il carbon black.

2.1.1 IL GRAFENE

Il grafene è un materiale costituito da uno strato monoatomico di atomi di carbonio, pertanto dello spessore di un solo atomo e quindi molto sottile. Le proprietà di questo materiale sono: leggerezza, elevata resistenza e buona duttilità. Queste caratteristiche vengono conferite dalla sua struttura atomica, infatti gli atomi sono ibridati nella forma sp^2 e si dispongono quindi a formare esagoni con angoli di 120°.

Questo è un reticolo esagonale bidimensionale a nido d'ape dove i singoli atomi di carbonio sono legati tramite legami covalenti [Figura 5].

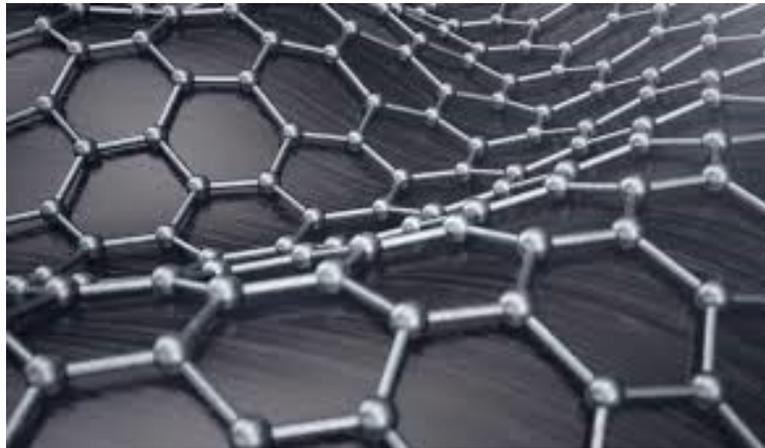


Figura 5 "Struttura reticolare esagonale del grafene"

La scoperta di questo nuovo materiale è stata fatta nel 2004 in un laboratorio inglese, da due scienziati, Andrej Geim e Konstantin Novosëlov, che stavano cercando di ottenere uno strato di grafite più sottile possibile. I due scienziati hanno asportato la grafite una striscia alla volta, fino a rimanere con uno strato di carbonio monoatomico, prima di allora ritenuto impossibile. Ad oggi esistono diversi metodi per produrre grafene (IV):

✓ Esfoliazione meccanica

L'esfoliazione meccanica della grafite consiste nell'applicazione di una forza alla superficie di cristalli di grafite altamente orientata, per staccare e dispiegare gli strati cristallini fino a ottenere il singolo strato.

In seguito, il gruppo di André Geim ha sviluppato un metodo molto semplice, universalmente noto come metodo scotch-tape, che usa semplice nastro adesivo per esfoliare la grafite [Figura 6]. La tecnica consiste nel porre la superficie di un cristallo di grafite sul nastro adesivo, staccare il nastro e pelare così alcuni strati di materiale. Il nastro con l'impronta della grafite è quindi ripiegato su sé stesso e svolto diverse volte. Ogni volta, i fiocchi depositi si dividono in strati sempre più sottili. Alla fine del processo, i sottili fiocchi adesivi possono essere trasferiti in maniera semplice ad un substrato isolante.



Figura 6 "Applicazione del metodo scotch-tape"

L'esfoliazione meccanica è il metodo più semplice e accessibile per isolare fiocchi di grafene della dimensione di alcuni micron quadri, utili per la ricerca di base sulle sue proprietà. Purtroppo questo metodo non è adatto per una produzione industriale.

✓ Esfoliazione in fase liquida

Il metodo si basa sull'utilizzo delle forze di pressione che si generano all'interno di un liquido. La grafite in polvere è mescolata ad un solvente dotato delle opportune qualità fisiche come viscosità, tensione superficiale, o in una miscela di acqua e surfattante. La sospensione è quindi sottoposta a miscelazione attraverso onde ultrasoniche, o mixer ad alta forza di taglio, o mulino a biglie, ecc.

Tali processi creano all'interno del liquido sia forze di taglio, sia di cavitazione, che causano la rottura dei cristalli di grafite secondo il piano basale, riducendoli a fogli sempre più sottili e, idealmente, singoli fogli di grafene. La sospensione risultante dal processo è poi purificata con ultracentrifugazione. Tale metodo risulta uno dei più promettenti dal punto di vista della scalabilità, e permette di ottenere grandi quantità di ottimo grafene. Per contro, i fiocchi risultano piuttosto piccoli come dimensioni laterali.

✓ Metodo chimico

I cristalli di grafite sono trattati con una soluzione fortemente acida a base di acido solforico e nitrico e poi ossidati ed esfoliati fino a ottenere cerchi di grafene con gruppi carbossilici ai bordi. Mediante trattamento con cloruro di tionile (SOCl₂), queste molecole periferiche sono trasformate in cloruri acilici (alogenuri acilici composti da un acile e un atomo di cloro) e poi in ammidi). Il risultato è un cerchio di grafene solubile in tetraidrofurano, tetraclorometano e dicloroetano. Grazie alle sue proprietà uniche questo materiale già da oggi ha avuto e sta avendo ampio utilizzo nei più variegati settori. Si pensa infatti che questo nuovo materiale innescherà la più grossa rivoluzione tecnologica dei prossimi vent'anni, cambiando la vita quotidiana di tutti noi. Tra i principali impieghi abbiamo:

✓ PROPRIETÀ ELETTRONICHE:

E' utilizzato come componente principale di un particolare tipo di batterie. Queste batterie si stanno estendendo in diversi settori, in particolare nella telefonia mobile dove, poco alla volta, stanno sostituendo le batterie al litio.

✓ PROPRIETÀ OTTICHE:

Sebbene lo spessore sia di un singolo atomo, il grafene assorbe solo il 2,3% delle radiazioni della luce su tutto lo spettro ottico.

✓ PROPRIETÀ TERMICHE:

Anche se di per sé il carbonio non conduce il calore la macromolecola di grafene è un ottimo conduttore di calore.

✓ PROPRIETÀ MECCANICHE:

Il materiale più sottile al mondo, il più trasparente (lascia passare infatti il 97,7% della luce) e il più resistente al mondo. Secondo i suoi scopritori, un singolo foglio di grafene (quindi un foglio alto 1 atomo) largo 1 metro quadro dal peso di 0,7 mg sarebbe potenzialmente capace di sostenere il peso di un gatto di 4 kg ed essere virtualmente invisibile.

✓ PROPRIETÀ ILLUMINANTI:

Ricercatori della Columbia Engineering hanno realizzato una lampadina che funziona come una normale lampadina a filamenti di tungsteno, ad incandescenza, ma capace di emettere luce grazie a un filamento incandescente di grafene. Per ottenere questo risultato gli scienziati hanno applicato dei piccoli elettrodi metallici su strisce di grafene invisibili ad occhio nudo. Quando nel circuito passa corrente elettrica, il grafene si riscalda fino a 2500 °C emettendo luce visibile.

✓ INFRASTRUTTURE:

Nell'Ottobre 2018 a Roma è stata realizzata la prima strada italiana a base di grafene, sfruttando il rifacimento di un tratto della provinciale Ardeatina.

Il tratto di strada è lungo circa 1 km e costituito da un supermodificante a base di grafene, che permette di aumentare notevolmente la vita utile dell'opera, mischiato ad una plastica dura(α).



Figura 7 "Pavimentazione stradale realizzata con l'utilizzo di bitume modificato con grafene"

✓ TOSSICITA':

La tossicità del grafene è stata discussa ampiamente nella letteratura scientifica. La raccolta più ampia riguardo alla tossicità del grafene riepiloga gli effetti in vitro, in vivo, antimicrobici e ambientali di questa sostanza ed evidenzia i vari meccanismi della tossicità del grafene stesso, che dipende da fattori come forma, dimensione, purezza della sostanza, fasi lavorative della post-produzione, stato ossidativo, gruppi funzionali, stato di dispersione, metodi di sintesi, dosi di somministrazione e tempi di esposizione. I nanonastri, le nanopiastrine e le nano-cipolle di grafene non sono tossiche fino alla concentrazione di 50 µg/mL. Queste nanoparticelle non alterano la differenziazione delle cellule staminali del midollo osseo in osteoblasti o adipociti, suggerendo che a basse dosi le nanoparticelle di grafene sono sicure per eventuali applicazioni biomediche. Dei cristalli di grafene multistrato dello spessore di 10 µm sono stati capaci di perforare le membrane cellulari in soluzione; una ricerca descrive la potenziale tossicità del grafene: intaccerebbe e danneggerebbe le cellule umane per via della sua natura bidimensionale, soprattutto quando finemente frammentato, come è anche stato segnalato per i fullereni. Gli effetti fisiologici del grafene rimangono incerti, e questo rimane un campo inesplorato (V).



Figura 8 "Dispositivi di protezione individuale da utilizzare per maneggiare grafene"

Il grafene come abbiamo visto viene utilizzato in campo stradale per la realizzazione di bitumi modificati. Nella fattispecie si è riuscito a realizzare una miscela bituminosa costituita da bitume, additivi leganti, grafene e plastica dura la quale è difficilmente riciclabile (giocattoli, bidoni e cestini di plastica, cassette per la frutta, tubi, tavoli e

sedie di plastica, secchi e bacinelle). L'utilizzo di questa miscela bituminosa è in grado di aumentare la durata della pavimentazione del 250%, ossia di raddoppiarne di gran lunga la sua vita utile. Si è potuto constatare un aumento di tutte le prestazioni, in particolare per quanto riguarda resistenza a trazione (+21÷35%), modulo di rigidezza (+21÷72%), resistenza all'ormaiamento (-35÷41% spessore e -43÷52% di velocità di ammaloramento) e resistenza a fatica (+167÷760%) (VI). Queste prestazioni, pertanto, ci permettono di ridurre gli interventi di manutenzione, ridurre le emissioni di CO2 per il rifacimento di nuovi manti stradali e ridurre l'utilizzo di materie prime preziose in esaurimento. Oltre a questo, ovviamente c'è anche l'aspetto ecologico, ossia la possibilità di utilizzare plastica dura e ottenere una pavimentazione 100% riciclabile, riducendo il quantitativo di rifiuti sul nostro pianeta.

2.1.2 IL CARBON BLACK

Il carbon black, detto anche nero di carbonio o nerofumo, è un pigmento ottenuto dalla combustione incompleta di prodotti petroliferi pesanti quali catrame di carbone fossile, catrame ottenuto dal cracking dell'etilene, ma anche da materiali organici come legno, ossa, grassi ed oli vegetali [Figura 9].



Figura 9 "Polvere di nerofumo"

Il nerofumo è una forma di carbonio para cristallino ed è formato da polvere finissima di carbone (polvere impalpabile) costituita al 95-99% da carbonio in varie strutture

allotropiche (grafite, fullereni) e molecole aromatiche. Viene prodotto con tre processi principali (VII):

- a) Processo CHANNEL BLACK: gas purificato contenente metano e fatto bruciare a bassa temperatura (500°C) ed in bassa presenza di aria, insufflandolo a pressioni di centesimi di atmosfera (0,5-4 cm acqua) da ugelli di ceramica. Il gas combusto lambisce il fondo esterno canaline di ferro in cui scorre acqua depositando polvere finissima. Le canaline vengono fatte vibrare in modo da fare staccare il nerofumo prodotto. Il processo ha una efficienza del 3-5% in nerofumo e le particelle hanno una taglia compresa tra 5 e 35 nanometri. Dopo queste operazioni occorre una purificazione del nerofumo con altri metodi per separare ghiaino, particelle grossolane e squame, attraverso setacciatura. La polvere di nerofumo viene trasportata sotto forma di sferette che sono state precedentemente essiccate a 65°.
- b) Processo a forno con parziale combustione: il metano ed idrocarburi più pesanti vengono fatto bruciare con quantità dosate d'aria in forni verticali/orizzontali. Il nerofumo prodotto viene fatto precipitare con cicloni di abbattimento polveri. Le particelle hanno una taglia di circa 50 -80 nm e la resa si aggira attorno al 60% rispetto al carbonio bruciando il gas a temperature di 1200°C ed utilizzando olio combustibile come fonte del nerofumo.
Questo processo è più efficiente del precedente nell'abbattere il nerofumo, ma richiede una tecnologia più costosa.
- c) Processo a decomposizione termica: le reazioni chimiche sono sempre quelle illustrate in precedenza tranne quella di produzione di CO₂. Il gas immesso viene separato in due flussi, uno che viene bruciato per produrre calore e l'altro che viene riscaldato da questo calore a 900°C decomponendosi secondo la reazione di produzione di Carbonio. Il gas residuo è praticamente idrogeno puro che trascina il nerofumo, che viene separato con umidificazione e filtri in tessuto. La resa in questo caso è circa 30% e le particelle hanno diametri tra 100 nm e 300 nm.

Negli anni addietro era possibile trovare sul mercato 3 differenti tipologie di carbon black ottenuti da differenti processi di produzione(VIII):

- Il nero d'avorio: veniva tradizionalmente prodotto carbonizzando l'avorio o le ossa di animali
- Il nero di vite: veniva tradizionalmente prodotto dalla carbonizzazione di viti e steli d'uva essiccati .
- Il nero della lampada: veniva tradizionalmente prodotto raccogliendo la fuliggine dalle lampade a olio.

Ad oggi il nerofumo viene utilizzato per molteplici scopi come, ad esempio, per la realizzazione di cinture, tubi flessibili, pellicole per gli imballaggi, vassoi per carne, nei toner delle fotocopiatrici a laser e quindi generalmente presente in vernici ed inchiostri [Figura 10].



Figura 10 "Tipico inchiostro al carbon black"

L'uso prevalente del nero di carbone (70%) si ha nell'industria della gomma e nella fattispecie nel settore automobilistico, dove viene ampiamente utilizzato per la realizzazione di pneumatici [Figura 11]. Questo pigmento viene largamente utilizzato perché aumenta la durabilità degli pneumatici.



Figura 11 "Pneumatico realizzato con nero di carbone"

Tra le tante proprietà che ha questo materiale abbiamo la conduzione del calore lontano dal battistrada e dall'area della cintura dello pneumatico, riducendo i danni termici e il miglioramento della resistenza a trazione, frizione e abrasione della gomma. Si è stimato che nell'ultimo anno sono state utilizzate più di 19,2 milioni di tonnellate di carbon black. Molteplici studi hanno dimostrato come il nero di carbonio sia possibilmente cancerogeno e nella fattispecie cancerogeno del gruppo 2B. Vi sono prove sufficienti negli animali da esperimento, che provengono da due studi di inalazione cronica e due studi di instillazione intratracheale, che hanno mostrato tassi significativamente elevati di cancro ai polmoni negli animali esposti. Tali studi sono stati svolti in Regno Unito e in Germania. Un terzo studio su oltre 5.000 lavoratori del nero di carbonio negli Stati Uniti non ha mostrato un'elevata mortalità. Mentre risultati più recenti sull'aumento della mortalità per cancro ai polmoni in un aggiornamento dello studio del Regno Unito suggeriscono che il nerofumo potrebbe essere un cancerogeno in fase avanzata. Tuttavia, ad oggi ci sono studi contrastanti che ci impediscono di affermare con certezza che questo materiale sia cancerogeno. Proprio per tale motivo sono essenziali i dispositivi di protezione individuale che devono essere obbligatoriamente indossati dagli operatori che maneggiano tale materiale nelle loro quotidiane lavorazioni.

L'Istituto nazionale per la sicurezza e la salute sul lavoro (NIOSH) ha fissato un limite di esposizione consigliato (REL) di $3,5 \text{ mg/m}^3$ su una giornata lavorativa di 8 ore. A livelli di 1750 mg/m^3 , il nerofumo è immediatamente pericoloso per la vita e

la salute . Sarebbe buona norma limitarne l'utilizzo e cercare di riciclarne il più possibile per limitare l'emissione di ulteriore anidride carbonica nell'atmosfera.



Figura 12 "Pittogramma di pericolo relativo a sostanze cancerogene"

Un ottimo metodo per riciclare questo materiale potrebbe essere quello di utilizzare polverino di gomma ottenuto riciclando vecchi pneumatici contenenti carbon black per realizzare bitumi modificati. Questo materiale infatti contribuirebbe a prolungare la durabilità del bitume stesso incrementando resistenza a trazione, frizione e abrasione. Questo materiale oltretutto essendo anche un ottimo isolante acustico favorirebbe la riduzione il rumore prodotto dal traffico (IX).

2.2 APPARECCHIATURE DI PROVA

2.2.1 ROTOVISCOSIMETRO BROOKFIELD

Il rotoviscosimetro (o viscosimetro rotazionale) è uno strumento utilizzato per misurare la viscosità, seguendo le indicazioni contenute nella norma UNI EN 13302 (2010) (X). Questo strumento misura la forza necessaria per mantenere in rotazione un disco o un cilindro, a velocità angolare costante immerso nel fluido da misurare. Esistono diverse tipologie di viscosimetri ed il primo strumento per la misurazione della viscosità fu inventato da George Gabriel Stokes e consiste nel misurare il tempo che un fluido impiega a transitare attraverso un capillare di vetro di lunghezza nota. Questo metodo è tuttora utilizzato per la misurazione standard della viscosità dell'acqua e più in generale per i fluidi newtoniani. Nel corso degli anni abbiamo potuto assistere all'avvento di strumentazioni più elaborate come il Viscosimetro di Hoppler, il Viscosimetro a vibrazione ed il più utilizzato Viscosimetro Brookfield [Figura 13] che sarà impiegato in questa sperimentazione.



Figura 13 "Rotoviscosimetro Brookfield"

La viscosità è una grandezza che consente di valutare il comportamento di un fluido quando viene sottoposto a uno sforzo tangenziale, quantificando la sua attitudine ad opporsi allo scorrimento.

Per la determinazione della "viscosità dinamica η " è stato utilizzato un rotoviscosimetro a cilindri coassiali costituito da un contenitore cilindrico esterno, nel quale si trova il materiale da testare, e un cilindro interno, ovvero la girante, attraverso la quale si applica la tensione tangenziale. Il viscosimetro rotazionale misura lo sforzo tangenziale (shear stress) compiuto dal motore per mantenere in movimento la girante a una determinata velocità di rotazione, correlabile alla velocità di scorrimento (shear rate) scelta dall'operatore e corrispondente ad una specifica percentuale di lavoro dello strumento, μ . Note queste due grandezze, lo strumento calcola quindi la viscosità e la fornisce direttamente sul display.

Il rotoviscosimetro Brookfield è costituito da diverse componenti:

- Termostato: questo è uno strumento che permette di impostare molto semplicemente la temperatura desiderata avere all'interno del fornello

elettrico. Tale termostato è in grado di raggiungere anche i 200°C con una precisione di un decimo di grado [Figura 14].



Figura 14 "Termostato"

- Fornello elettrico: è la componente che permetterà di fornire calore al bitume. Non a caso il fornello elettrico presenta una cavità circolare al suo interno dove sarà possibile alloggiare il cilindro in acciaio contenente bitume. Il fornello sarà inoltre protetto esternamente da un para-calore in acciaio inox al fine di proteggere gli utenti da eventuali ustioni [Figura15].



Figura 15 "Fornello elettrico"

- Monoblocco di misura con display: è la componente principale del rotoviscosimetro Brookfield, infatti sul suo display è possibile leggere la temperatura del fornello elettrico T (°C) (attraverso un termometro interno), la velocità angolare ω (RPM), lo sforzo torcente μ (%), la viscosità in valore reale

η e logaritmico $\log \eta$ (mPa*s), lo Shear Stress SS (N/m²) e Shear Rate SR (s⁻¹) [Figura 16].

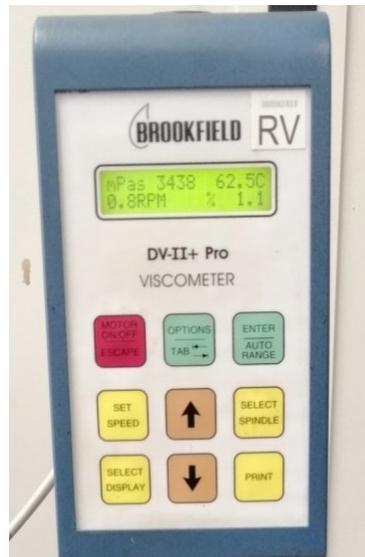


Figura 16 "Monoblocco di misura"

- Contenitore cilindrico in acciaio: per ogni tipo di bitume ne viene utilizzato uno nuovo. Ciascun contenitore dovrà essere scaldato in forno prima della colatura del bitume per evitare raffreddamenti di quest'ultimo [Figura 17].

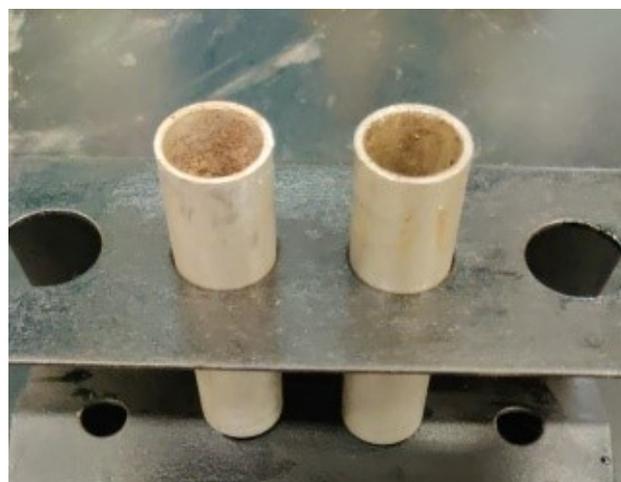


Figura 17 "Contenitore cilindrico in acciaio"

- Girante con gambo: è lo strumento che viene completamente immerso nel bitume e fatto ruotare su se stesso a diverse velocità in modo da quantificare l'attitudine del bitume ad opporsi allo scorrimento e misurare lo sforzo

tangenziale. Questa è disponibile in 3 diverse dimensioni, S28, S27, S21 [Figura 18].



Figura 18 "Da sinistra a destra abbiamo le Giranti S28,S27,S21

Per quanto concerne la procedura di prova essa prevede i seguenti passaggi:

- 1) Riscaldamento del bitume per circa 30 minuti ad una temperatura di 140°C al fine di renderlo sufficientemente fluido per essere colato all'interno del contenitore cilindrico in acciaio. Negli ultimi 10 minuti vengono messi in forno anche la girante ed il cilindro in acciaio in modo tale che non raffreddino il bitume colato e facilitando l'immersione della girante in quest'ultimo.
- 2) Nel frattempo che il bitume si riscaldi verifichiamo che il rotoviscosimetro Brookfield sia "in bolla" attraverso le due livelle sferiche presenti alla base del treppiedi di supporto e in testa al monoblocco di lettura.
- 3) Fatto ciò, accendo il termostato impostando la prima temperatura di lavoro che sarà di 60°C, e allo stesso tempo accendo anche il viscosimetro a rotazione Brookfield che farà la sua auto calibrazione.
- 4) A questo punto si sceglie la girante da impiegare tra S21, S27 e S28 [Figura18] e si imposta sullo strumento attraverso il tasto "Select spindle". Tale scelta è influenzata dal tipo di materiale e dalla temperatura.
- 5) In particolare, per le temperature minori (viscosità maggiore) si impiegano giranti più piccole per non sforzare troppo lo strumento, mentre alle temperature più alte (viscosità inferiore) si utilizzano giranti di dimensioni maggiori per avere una maggiore accuratezza nella misura. Nel caso in esame sono state adottate, salvo eccezioni, la S27 da 60° a 120°C e la S21 da 140° a 180°C. Questa scelta è dovuta al fatto che raggiunta una

determinata temperatura la velocità angolare dello strumento non è più in grado di raggiungere un determinato sforzo tangenziale pertanto è necessario montare una girante più grande. È importante osservare che nel momento in cui la girante viene cambiata essa dovrà essere stata messa precedentemente in forno in modo tale da non diminuire la temperatura del bitume e attendere un tempo di condizionamento di circa 30 minuti.

- 6) A questo punto si versa una quantità di bitume pari a $10,5 \pm 0,5$ g all'interno del contenitore cilindrico in acciaio cercando di non farlo colare dalle pareti ma direttamente sul fondo per perderne il meno possibile [Figura 19]. Per colare il giusto quantitativo di bitume si ricorre all'utilizzo di un supporto e di una bilancia elettronica con una sensibilità del centesimo di grammo. Anche la bilancia dovrà essere messa in bolla prima del suo utilizzo.

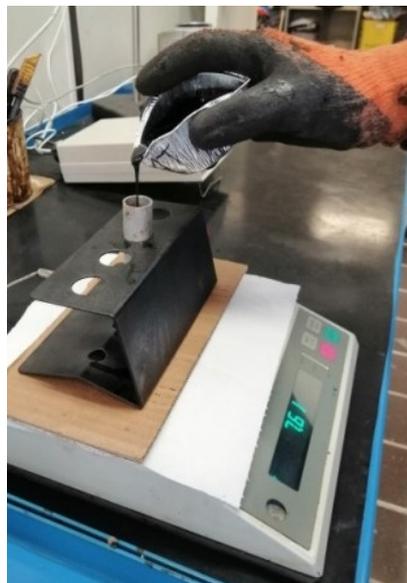


Figura 19 "Colatura del bitume fluido nel cilindro in acciaio"

- 7) Una volta versato il corretto quantitativo di bitume si prende il cilindro e lo si alloggia nella sua sede presente nel fornello elettrico assicurandosi che sia ben fissato [Figura20]. Questo è un passaggio fondamentale in quanto un errato montaggio del provino potrebbe compromettere i risultati di un'intera prova.



Figura 20 "Posizionamento del provino nel fornello elettrico"

- 8) Fatto ciò si procede con il montaggio del gambo con la relativa girante alla base del rotore che conferirà il momento torcente per misurare lo sforzo tangenziale [Figura 21]. Questa è una fase molto delicata in quanto, il gambo, particolarmente duttile potrebbe deformarsi in seguito ad un brusco montaggio della girante.



Figura 21 "Gambo e Girante correttamente applicati al rotore"

- 9) Una volta montato il tutto si immerge la girante nel bitume attraverso l'utilizzo di una manopola posta lungo il montante del viscosimetro a rotazione [Figura 22]. Nella presente indagine sperimentale ogni materiale oggetto di studio è stato testato a sette diverse temperature: 60°C - 80°C - 100°C - 120°C - 140°C - 160°C - 180°C, partendo dalla temperatura più bassa.

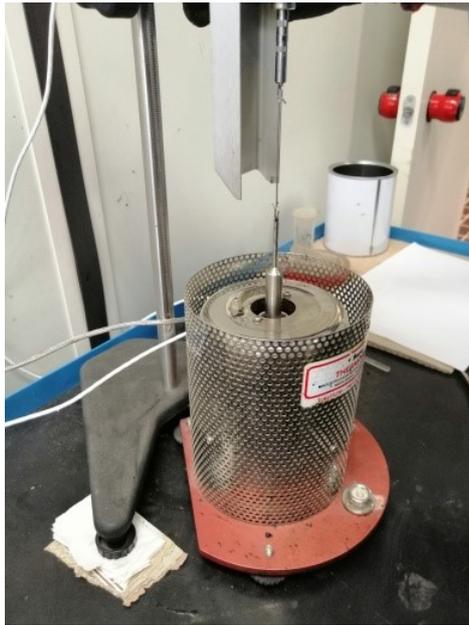


Figura 22 "Immersione della Girante nel cilindro contenete bitume"

- 10) Il tempo di condizionamento del sistema bitume-girante alla prima temperatura di prova sarà di 45 minuti. Per le temperature successive il tempo di condizionamento si riduce a 20 minuti ad eccezione del caso in cui ho cambio di girante dove sarà di 30 minuti.
- 11) Una volta immersa la girante si imposta la velocità di rotazione a cui eseguire la prova, tramite il tasto "Set speed" e si avvia lo strumento cercando di individuare quella velocità che fornisce uno sforzo torcente prossimo al 50%. Per ogni temperatura si effettueranno almeno 2 letture: una minore e una maggiore del 50%.
- 12) Avviato lo strumento si deve attendere, tra una lettura e l'altra, un tempo di almeno 5 minuti, necessari per la stabilizzazione della lettura. A questo punto si registrano tutti i dati forniti dallo strumento, ossia il valore della viscosità, la velocità di rotazione (in RPM), la percentuale di lavoro dello strumento, lo shear Stress e Rate e la temperatura di prova. I punti 8, 9 e 10 vengono ripetuti per ogni temperatura di prova sul medesimo provino.

2.2.2 METODI DI INVECCHIAMENTO: RTFOT e PAV

Tra le varie tipologie di bitumi testati ci sono i bitumi invecchiati a breve termine e quelli a lungo termine. Scopriamo adesso qualcosa in più su queste 2 tecniche di invecchiamento. Le principali prove riconosciute a livello nazionale, europeo ed internazionale per l'invecchiamento del bitume in laboratorio sono la prova RTFOT , Rolling Thin Film Oven Test, con metodologia di prova standardizzata dalla UNI EN 12607 per quello a breve termine e la prova PAV, Pressure Aging Vessel, normata dalla UNI EN 14769 (anno), per quello a lungo termine.

RTFOT (ROLLING THIN FILM OVEN TEST)

Questa prova ha come obiettivo quello di riprodurre l'invecchiamento subito dal bitume durante la miscelazione in impianto durante la preparazione del conglomerato e nella successiva fase di trasporto. Ciò è possibile attraverso l'impiego di calore ed aria in pressione che viene gettata su di un sottile strato di bitume in movimento. L'invecchiamento come ben sappiamo provocherà un ossidazione del bitume e lo renderà più rigido. Nella fattispecie avremo un notevole incremento della viscosità del bitume a parità di temperatura e sforzo torcente. L'apparecchiatura di prova è sostanzialmente composta da(XI):

- un forno a doppia parete e riscaldato elettronicamente [Figura 23]. Le dimensioni interne sono: altezza di 340 ± 15 mm, larghezza di 405 ± 15 mm e profondità di 445 ± 15 mm. Lo sportello di ingresso presenta una finestra con doppio vetro resistenti al calore e separate con un intercapedine. Il forno deve essere in grado di immettere un flusso d'aria di 4000 ml/min a temperatura e pressione costanti.



Figura 23 "Forno elettrico a doppia parete"

- 8 contenitori cilindrici in vetro (simili a dei bicchieri), nei quali viene messo il campione di legante bituminoso sottoposto alla prova. La prova consiste nel sottoporre una quantità di bitume nota ($35 \pm 0,5$ g in ciascun bicchiere) all'interno di recipienti cilindrici posti a loro volta all'interno del tamburo rotante in acciaio contenuto nel forno che ruota ad una velocità di 15 giri/min [Figura 24]. Il numero massimo di bicchieri da poter inserire è pari a otto. Qualora servisse meno materiale invecchiato, i bicchieri vuoti vanno comunque inseriti nel tamburo rotante in posizioni diametralmente opposte. I campioni vengono sottoposti a un getto di aria controllato con portata di 4000 ml/min.



Figura 24 "Tamburo rotante in acciaio"

La stufa viene preriscaldata, per circa un'ora, fino al raggiungimento della temperatura di prova pari a $163 \pm 1^\circ\text{C}$; successivamente vengono introdotti, nelle apposite postazioni del tamburo rotante, i bicchieri contenenti il bitume e, non appena la temperatura del forno ritorna alla temperatura di prova, si azionano la rotazione del tamburo, la ventilazione ed il getto d'aria, e si fanno partire i 75 minuti della prova. Al termine del trattamento si procede all'estrazione dei bicchieri, i quali saranno totalmente ricoperti da un sottile film di bitume, e si va a recuperare il materiale invecchiato da sottoporre successivamente alle prove (o al processo di invecchiamento a lungo termine).

PAV (PRESSURE AGING VESSEL)

Il **Pressure Aging Vessel** test permette di simulare l'invecchiamento che il legante subisce nei primi 10-15 anni di vita della pavimentazione, vale a dire l'invecchiamento a lungo termine. Questo invecchiamento può essere riprodotto nell'arco di 20 ore grazie alla combinazione degli effetti di pressione e temperatura che permettono di riprodurre le trasformazioni che la pavimentazione subirebbe in 10-15 anni. Queste sono trasformazioni che il materiale subisce a causa del traffico (carichi veicolari) e degli agenti atmosferici. L'apparecchiatura è essenzialmente composta da(XII):



Figura 25 " Forno elettrico in acciaio per PAV"

- Un forno progettato per funzionare a 2,1 MPa tra gli 80 e 115°C, realizzato in acciaio inossidabile con dimensioni di circa 50x30x40 [Figura 25].
- Un castelletto capace di contenere un determinato numero di provini. Il fondo del forno deve essere tale da garantire che i contenitori con i provini vengano tenuti in posizione perfettamente orizzontale con lo strato di legante bituminoso uniformemente distribuito lungo la superficie del contenitore.
- Una serie di piattini in acciaio che dovranno essere impilati nel castelletto con diametro di 140 mm, che permettano di inserire $50,0 \pm 0,5$ g di legante bituminoso.

Il bitume da utilizzare è quello che ha già subito invecchiamento a breve termine (RTFOT), che dovrà essere riscaldato precedentemente in forno e poi

colato nei piatti metallici del PAV per essere sottoposto all'invecchiamento a lungo termine. Successivamente i piatti vengono posizionati, per un massimo di dieci, nel castelletto e messi nel vano interno del forno, pronti per essere invecchiati.

La procedura di prova è la seguente:

- 1) Accensione dell'apparecchiatura e selezione della configurazione di prova automatica.
- 2) Scelta dei valori di pressione ($P = 2.1 \pm 0.1$ MPa) e temperatura ($T = 90 - 100 - 110$ °C), in funzione della massima temperatura d'esercizio prevista per la pavimentazione. Nel nostro particolare caso è stata considerata una temperatura di 100°C, che può essere adottata per massime temperature di esercizio "ordinarie".
- 3) Pre-riscaldamento dell'apparecchiatura vuota fino alla temperatura di 90 °C.
- 4) Riscaldamento dei bitumi invecchiati RTFOT in forno a 130°C per circa 20 minuti al fine di raggiungere un'adeguata viscosità per essere colato.
- 5) Colare ogni differente tipologia di bitume in un piattino diverso per una quantità pari a $50,0 \pm 0,5$ g mediante l'utilizzo di una bilancia elettronica, precedentemente "messa in bolla" [Figure26].



Figura 26 " Dosaggio di bitume con bilancia elettronica"

- 6) I 7 piattini di bitume vengono impilati nei rispettivi piani del castelletto. Successivamente quest'ultimo viene posizionato all'interno del forno e chiuso ermeticamente con dei bulloni per evitare perdite di calore e di pressione. Successivamente alla chiusura della piastra viene anche messo un cappuccio

termoisolante in testa per impedire scambio di calore con l'esterno [Figure 27].



Figure 27 “Alloggiamento del castelletto all'interno del forno”

- 7) Pressurizzazione e raggiungimento delle condizioni di prova (in termini di pressione e temperatura). Il raggiungimento del valore di prova della pressione è garantito attraverso il collegamento dell'apparecchiatura a una bombola esterna, mentre il mantenimento dei valori di pressione e temperatura durante la prova è assicurato da un dispositivo O-ring e dalla perfetta chiusura dei sei bulloni presenti nel coperchio dell'apparecchiatura.
- 8) Fase di invecchiamento della durata di 20 ore.
- 9) Depressurizzazione.
- 10) Apertura del coperchio per l'estrazione del castelletto contenente i piatti di materiale e spegnimento dell'apparecchiatura. Il display dell'apparecchiatura permette di visualizzare la successione delle fasi descritte, e al termine di ciascuna di esse appare una spia verde che ne segnala il relativo completamento.
- 11) I provini che vengono estratti dal Pressure Aging Vessel, in seguito agli effetti combinati di pressione e temperatura, mostrano, più o meno frequentemente, bolle d'aria superficiali [Figura 28]. Risulta quindi necessario, per eliminare quanto più possibile tali bolle, riscaldare i provini in forno a 170°C per 30 minuti, come specificato dalla norma di riferimento (UNI EN 14769, anno).



Figura 28 "Provini di bitume
con bolle d'aria"

12) Terminata questa fase, si procede a recuperare il materiale invecchiato dai piatti in acciaio, versandolo in differenti contenitori aiutandoci con una spatola per perderne il minor quantitativo possibile [Figura 29]. Questi 7 bitumi invecchiati a lungo termine verranno poi studiati mediante l'utilizzo del Rotoviscosimetro Brookfield.



Figura 29 "Recupero di bitume
dai piattini"

CAPITOLO 3 - RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 BITUME DI RIFERIMENTO

3.1.1 BITUME DI RIFERIMENTO NO AGED

Nome		RIFERIMENTO				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	1,2	49,8	104000	5,0	42,3	0,408
60	1,4	58,4	104000	5,0	49,6	0,476
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	12	49,6	10333	4,0	42,2	4,08
80	15	61,7	10283	4,0	52,4	5,1
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	70	52	1857	3,3	44,2	23,8
100	60	44,5	1854	3,3	37,8	20,4
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	200	41,4	517,4	2,7	35,2	68
120	50	53,3	533	2,7	24,7	46,5
120	40	42,6	532,5	2,7	19,8	37,2
120				#NUM!		
140	135	51,8	191,9	2,3	24,1	126
140	120	46,1	192,1	2,3	21,4	112
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	200	34,2	85,5	1,9	15,9	186
160				#NUM!		
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	17,8	44,5	1,6	8,28	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 1 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

RIFERIMENTO NO AGE			
Temperatura T [°C]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	104000	5,0	0,408
80	10333	4,0	4,08
100	1857	3,3	23,8
120	533	2,7	46,5
140	191,9	2,3	126
160	85,5	1,9	186
180	44,5	1,6	186

Tabella 2 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% "

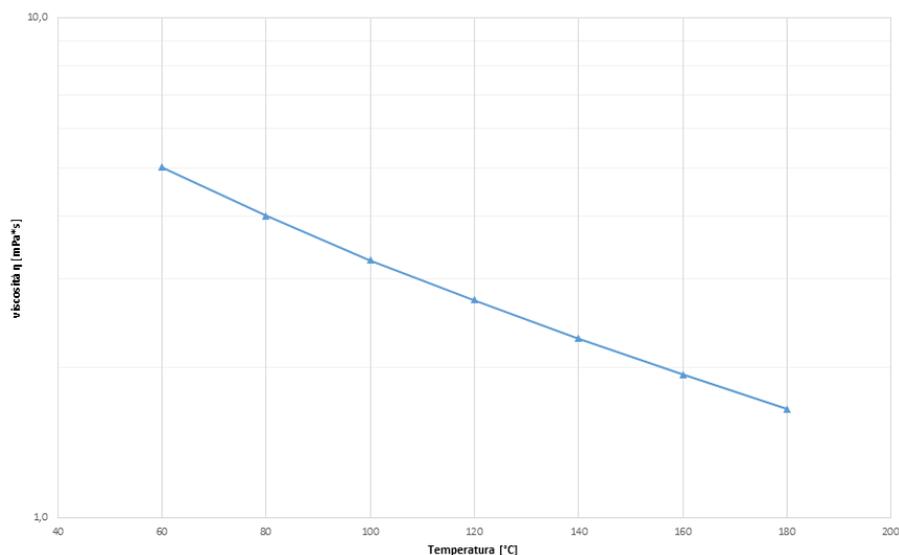


Grafico 1 "Viscosità-Temperatura per bitume di Riferimento No Aged"

3.1.2 BITUME DI RIFERIMENTO RTFOT

Nome		RIFERIMENTO		Test 1		
Invecchiamento		RTFOT				
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,5	51,8	259000	5,4	44	0,17
60	0,4	41,6	260000	5,4	35,4	0,136
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	5	41,7	20850	4,3	35,4	1,7
80	6	48,6	20250	4,3	41,3	2,04
80	7,5	60,5	20167	4,3	51,4	2,55
80				#NUM!		
100	40	50,2	3138	3,5	42,7	13,6
100	35	43,5	3107	3,5	37	11,9
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	180	54,5	756,9	2,9	46,4	31,2
120	160	48,1	751,6	2,9	40,9	54,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	100	52	260	2,4	24,2	93
140	90	46,6	258,9	2,4	21,7	83,7
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	200	43,4	108,5	2,0	20,2	186
160				#NUM!		
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	21,5	53,8	1,7	10	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 3 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

RIFERIMENTO RTFOT			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	259000	5,4	0,17
80	20250	4,3	2,04
100	3138	3,5	13,6
120	751,6	2,9	54,4
140	260	2,4	93
160	108,5	2,0	186
180	53,8	1,7	186

Tabella 4 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

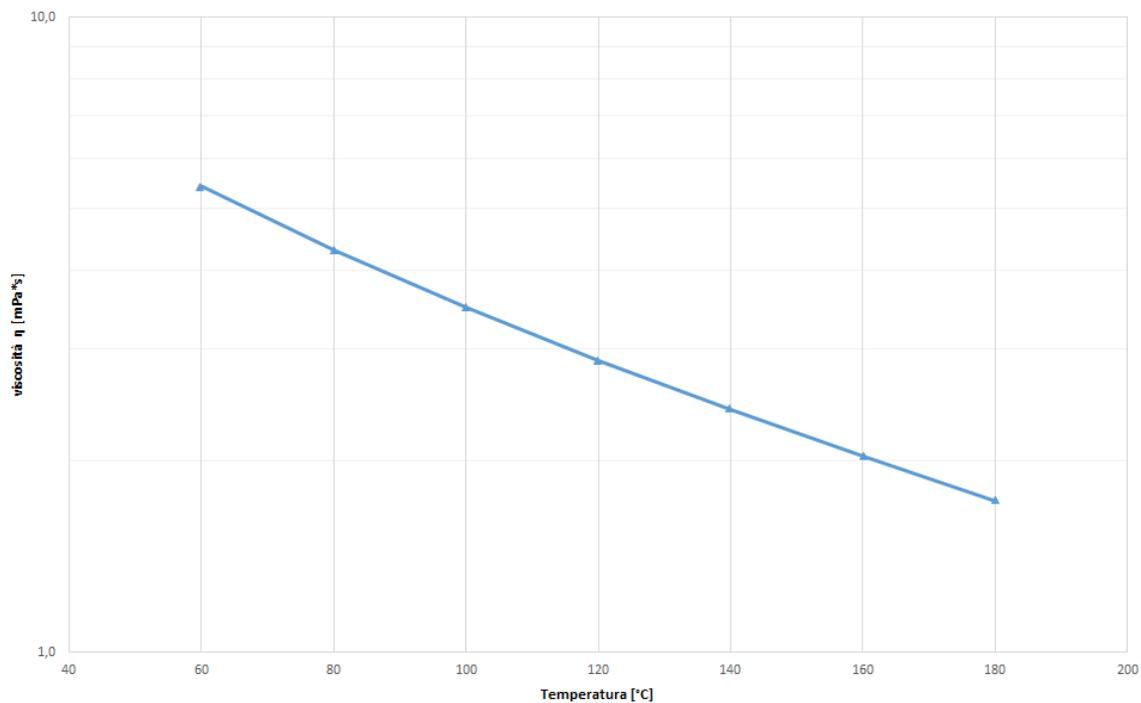


Grafico 2 "Viscosità-Temperatura per bitume di Riferimento RTFOT"

3.1.3 BITUME DI RIFERIMENTO PAV

Nome		RIFERIMENTO				
Invecchiamento		PAV				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,03	39	3250000	6,5	33,2	0,00
60	0,05	61,8	3100000	6,5	52,5	0,017
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	1	46,8	117000	5,1	39,8	0,34
80	1,1	50,9	116000	5,1	43,3	0,374
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	12	51,8	10792	4,0	44	4,08
100	10	43,3	10825	4,0	36,8	3,4
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	70	52,8	1886	3,3	44,9	23,8
120	60	45,3	1887	3,3	38,5	20,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	50	50,5	505,5	2,7	23,5	46,5
140	45	45,4	504,4	2,7	21,1	41,8
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	140	50,8	181,4	2,3	23,6	130
160	135	49	181,5	2,3	22,8	126
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	33,8	84,5	1,9	15,7	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 5 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

RIFERIMENTO PAV			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	3250000	6,5	0,01
80	116000	5,1	0,374
100	10792	4,0	4,08
120	1886	3,3	23,8
140	505	2,7	46,5
160	181,4	2,3	130
180	84,5	1,9	186

Tabella 6 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

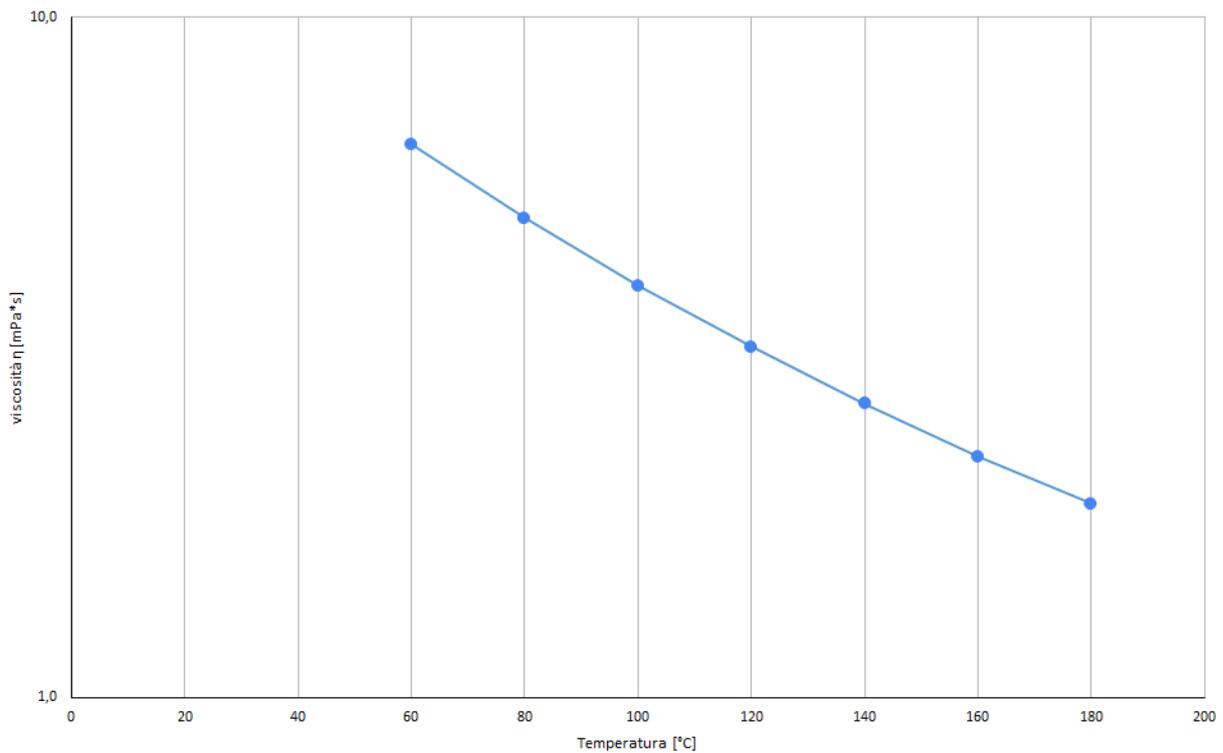


Grafico 3 "Viscosità-Temperatura per bitume di Riferimento PAV"

3.1.4 GRAFICO RIEPILOGATIVO

BITUMI DI RIFERIMENTO VISCOSITA'/TEMPERATURA

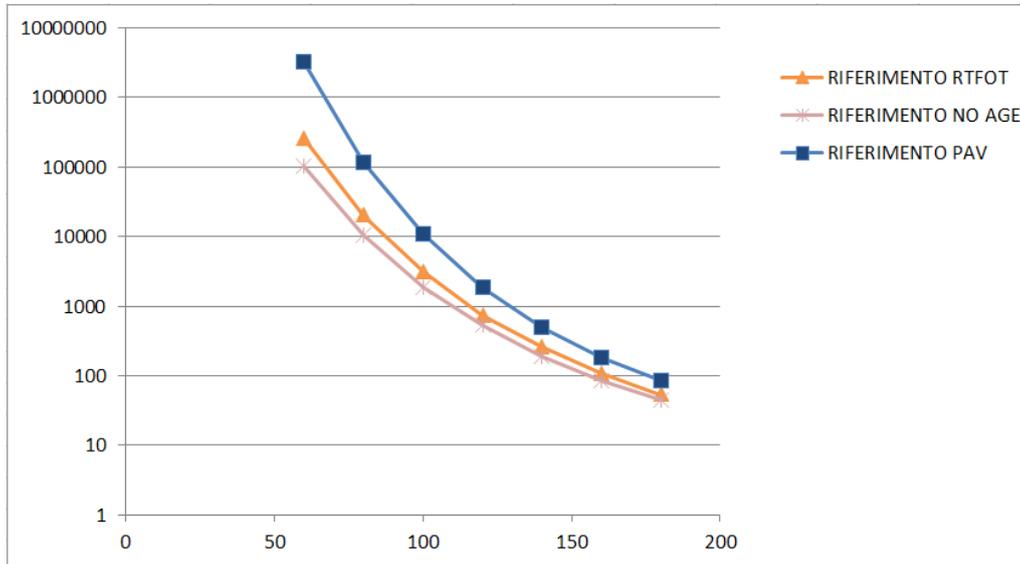


Grafico 2 "Viscosità-Temperatura per tutti i bitumi di Riferimento"

BITUMI DI RIFERIMENTO LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

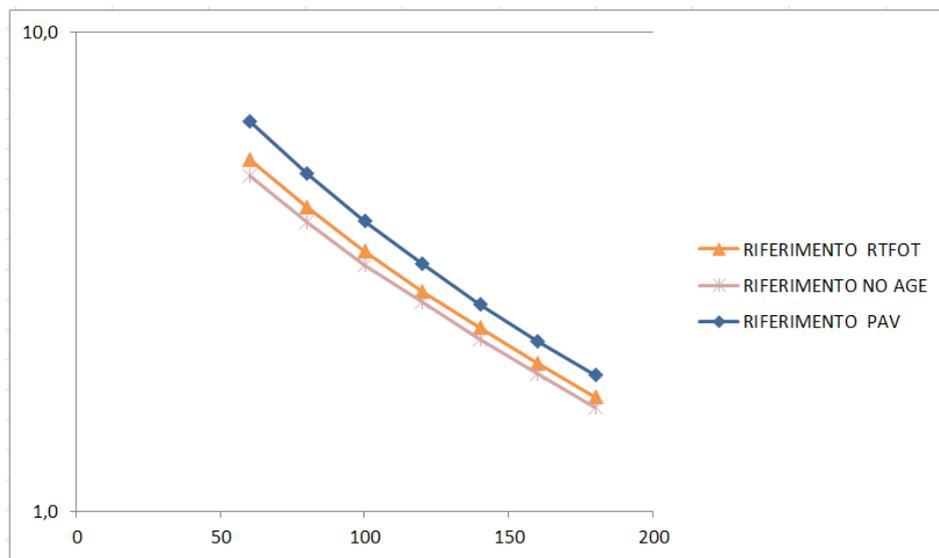


Grafico 3 "logViscosità-Temperatura per tutti i bitumi di Riferimento"

Nel [Grafico4][Grafico 5] sono rappresentate le caratteristiche del bitume di riferimento ai vari stati di invecchiamento. Osserviamo che il Riferimento PAV ha viscosità sempre maggiore degli altri soprattutto a basse temperature.

3.2 BITUME COMPOUND A

3.2.1 BITUME COMPOUND A NO AGE

3.2.1.1 BITUME COMPOUND A 1.5% NO AGE

Nome		COMPOUND A 1,5%				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	logη	Shear Stress SS [N/m²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,7	47,7	170000	5,2	40,5	0,238
60	0,8	54,2	169000	5,2	46,1	0,272
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	7,5	52,5	17500	4,2	44,6	2,55
80	6	41,7	17375	4,2	35,4	2,04
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	40	51	3188	3,5	43,4	13,6
100	35	44,6	3186	3,5	37,9	11,9
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	150	50,9	848,3	2,9	43,3	51
120	140	47,4	846,4	2,9	40,3	47,6
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	80	51,2	320	2,5	23,8	74,4
140	75	48	320	2,5	22,3	69,7
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	180	51	141,7	2,2	23,6	167
160	160	45,2	141,3	2,2	21	149
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	29,1	72,8	1,9	13,5	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 7 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

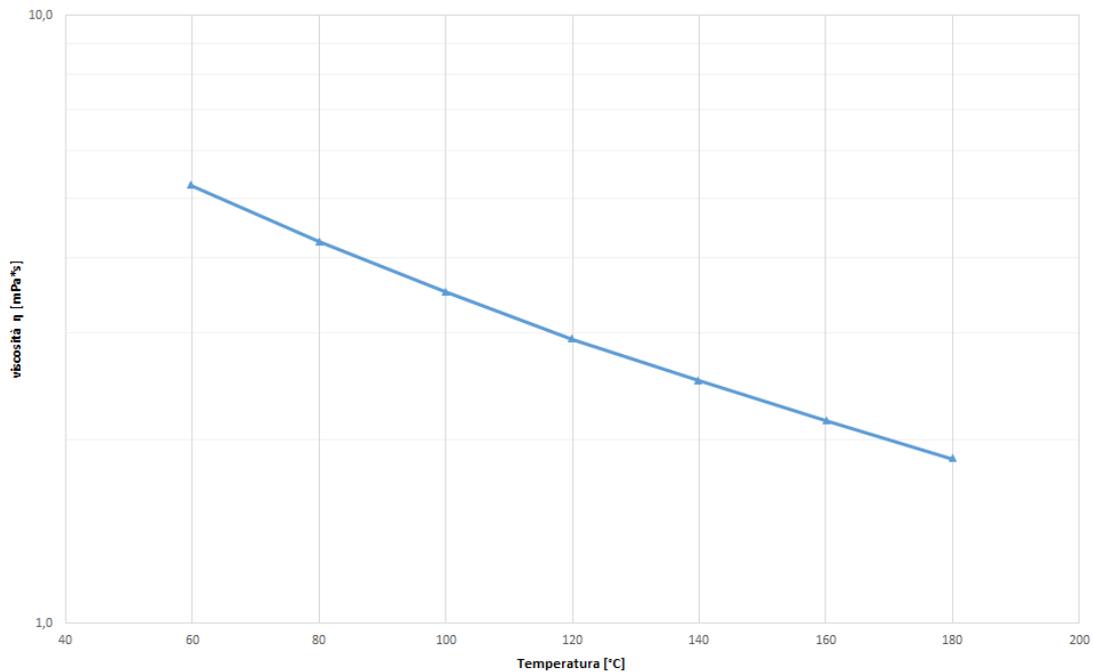


Grafico 6 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 1,5% NO AGE"

Temperatura T [°C]	COMPOUND A 1,5% NO AGE		
	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	logη	
60	170000	5,2	0,238
80	17500	4,2	2,55
100	3188	3,5	13,6
120	848,3	2,9	51
140	320	2,5	74,4
160	141,7	2,2	167
180	72,8	1,9	186

Tabella 8 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

3.2.1.2 BITUME COMPOUND A 2,0% NO AGE

Nome		COMPOUND A 2%				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	logη	Shear Stress SS [N/m²]	Shear Rate SR [s⁻¹]
60	0,8	52,7	165000	5,2	44,8	0,272
60	0,7	46,5	166000	5,2	39,5	0,238
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	7,5	54,2	18067	4,3	46,1	2,55
80	6	42,8	17833	4,3	36,4	2,04
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	40	51,6	3225	3,5	43,9	13,6
100	35	45,1	3221	3,5	38,3	11,9
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	140	49,3	880,4	2,9	41,9	47,6
120	150	52,5	875	2,9	44,6	51
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	80	51,2	320	2,5	23,8	74,7
140	75	48,1	320,7	2,5	22,4	69,7
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	180	49,6	137,8	2,1	23,1	167
160	200	54,8	137	2,1	25,5	186
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	27,6	69	1,8	12,8	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Temperatura T [°C]	COMPOUND A 2% NO AGE		Shear Rate SR [s⁻¹]
	η [mPa*s]	logη	
60	165000	5,2	0,272
80	18067	4,3	2,55
100	3225	3,5	13,6
120	880,4	2,9	47,6
140	320	2,5	74,7
160	137,8	2,1	167
180	69	1,8	186

Tabella 10 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

Tabella 9 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

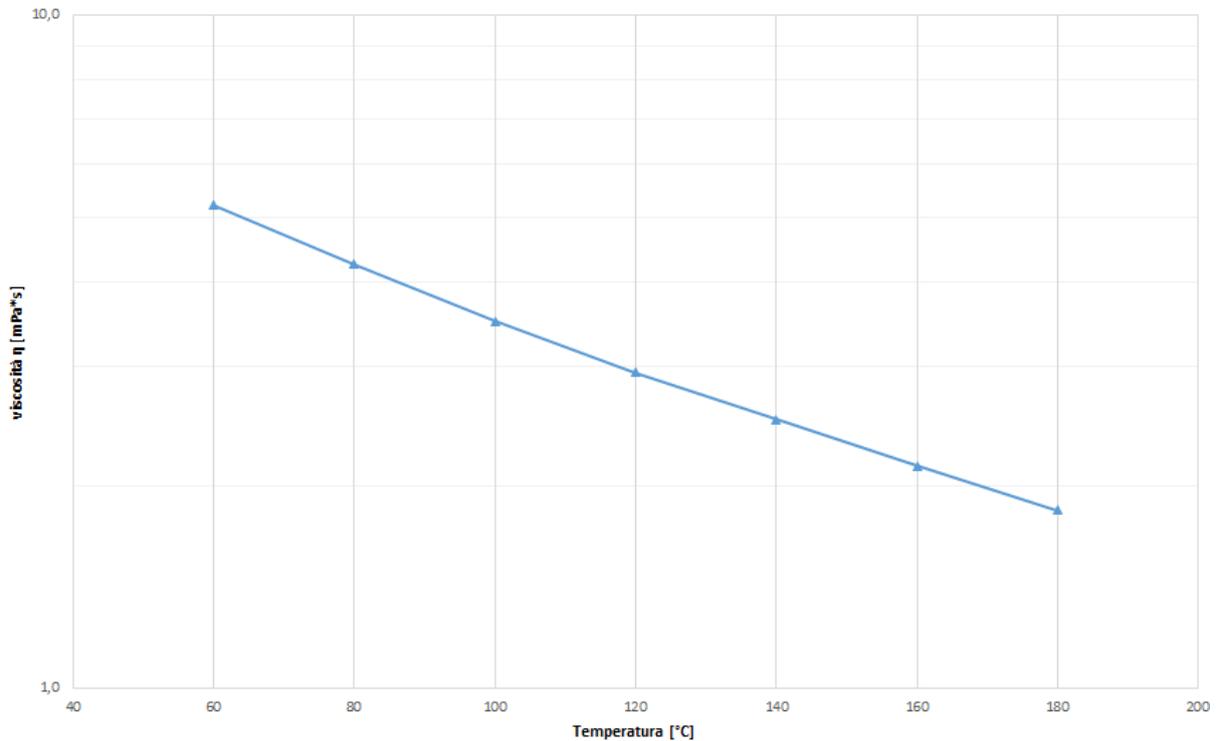


Grafico 7 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 2% NO AGE"

3.2.1.3 BITUME COMPOUND A 3,0% NO AGE

Nome		COMPOUND A 3%				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,7	50,8	181000	5,3	43,2	0,238
60	0,6	43,6	182000	5,3	37,1	0,204
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	7,5	57,6	19200	4,3	49	2,55
80	6	45,9	19125	4,3	39	2,04
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	35	49,5	3536	3,5	42,1	11,9
100	40	56,5	3531	3,5	48	13,6
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	135	51,8	959,3	3,0	44	45,9
120	120	45,8	954,2	3,0	38,9	40,8
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	70	49	350	2,5	22,8	65,1
140	75	52,2	348	2,5	24,3	69,7
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	180	52,8	146,7	2,2	24,6	167
160	160	46,7	145,9	2,2	21,7	149
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	28,8	72	1,9	13,4	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 11 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND A 3% NO AGE			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	181000	5,3	0,238
80	19125	4,3	2,04
100	3536	3,5	11,9
120	959,3	3,0	45,9
140	350	2,5	65,1
160	146,7	2,2	167
180	72	1,9	186

Tabella 12 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

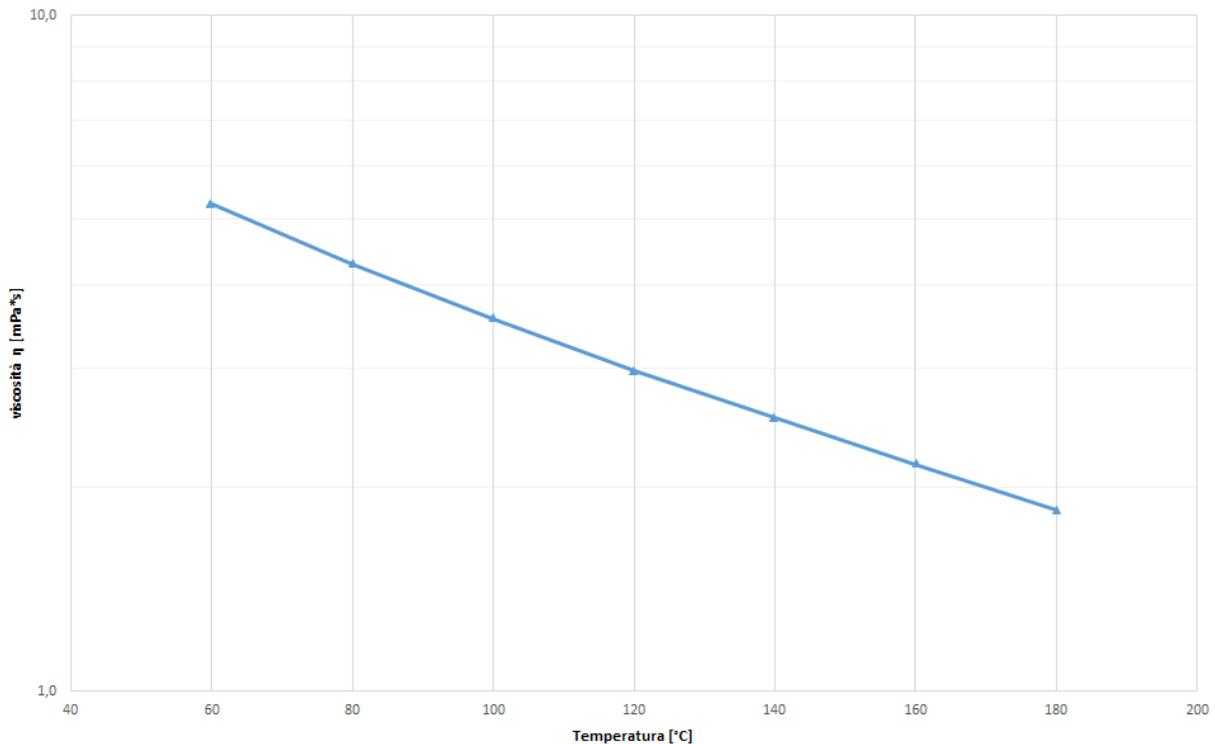


Grafico 8 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 3% NO AGE"

3.2.1.4 BITUME COMPOUND A 5,0% NO AGE

Nome		COMPOUND A 5 %				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,8	47,3	148000	5,2	40,2	0,272
60	0,9	54	150000	5,2	45,9	0,306
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	8	52	16250	4,2	44,2	2,72
80	7,5	48	16000	4,2	40,8	2,55
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	45	55,3	3072	3,5	47	15,3
100	35	41,4	2957	3,5	35,2	11,9
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	135	44,4	822,2	2,9	37,7	45,9
120	150	49,8	830	2,9	42,3	51
120	160	53,4	834,4	2,9	45,4	54,4
120				#NUM!		
140	90	54,5	302,8	2,5	25,3	83,7
140	80	47,5	296,9	2,5	22,1	74,4
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	200	52	130	2,1	24,2	186
160	180	46	127,8	2,1	21,4	167
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	22,7	56,8	1,8	10,6	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 13 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

Temperatura T [°C]	COMPOUND A 5% NO AGE		
	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	148000	5,2	0,272
80	16250	4,2	2,72
100	3072	3,5	15,3
120	830	2,9	51
140	296,9	2,5	74,4
160	130	2,1	186
180	56,8	1,8	186

Tabella 14 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% "

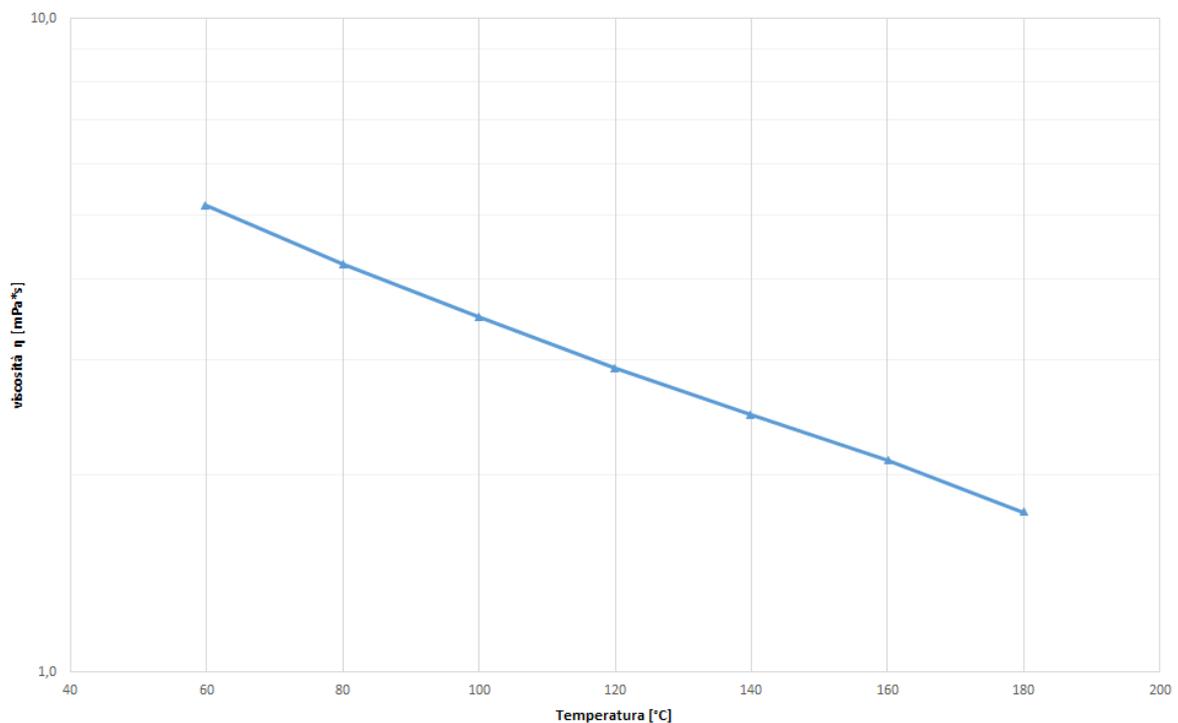


Grafico 9 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 5% NO AGE"

3.2.1.5 GRAFICO RIEPILOGATIVO

BITUMI COMPOUND A NO AGE VISCOSITA'/TEMPERATURA

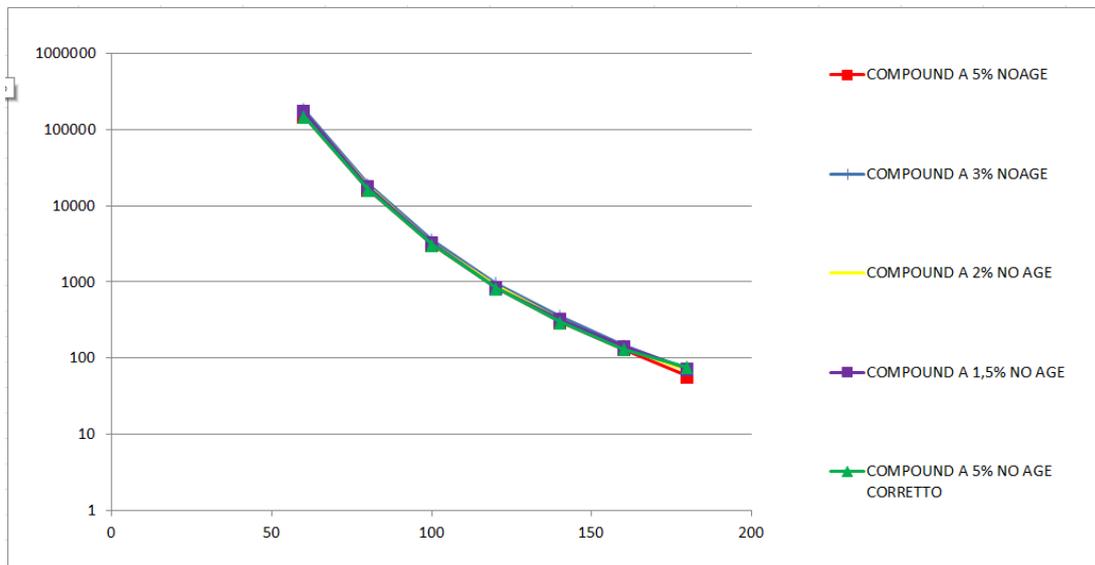


Grafico 10 "Viscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND A NO AGE"

BITUMI COMPOUND A NO AGE LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

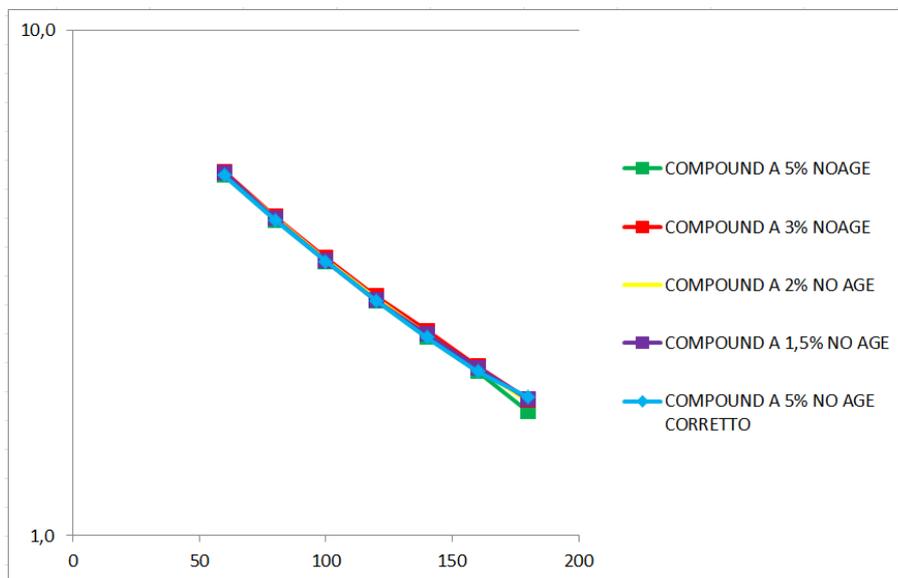


Grafico 11 "logViscosità-Temperatura per tutti i bitumi di Riferimento"

Nel [Grafico 10][Grafico 11] sono rappresentate le caratteristiche del bitume COMPOUND A NO AGE ai vari dosaggi di carbon black. Osserviamo che i parametri di viscosità sono pressoché simili per tutti i campioni analizzati.

3.2.2 BITUME COMPOUND A RTFOT

3.2.2.1 BITUME COMPOUND A 1,5% RTFOT

Nome		COMPOUND A 1,5%				
Invecchiamento		RTFOT				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log\eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,6	50,2	209000	5,3	42,7	0,204
60	0,5	41,5	208000	5,3	35,3	0,17
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	6	47,1	19625	4,3	40,1	2,04
80	7,5	58,1	19367	4,3	49,4	2,55
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	35	46,7	3336	3,5	39,7	11,9
100	40	53	3313	3,5	45,1	13,6
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	140	47,9	855,4	2,9	40,7	47,6
120	150	51,3	855	2,9	43,6	51
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	90	54,8	304,4	2,5	25,5	83,7
140	80	48,5	303,1	2,5	22,6	74,4
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	200	51,3	128	2,1	23,9	186
160	180	46	127,8	2,1	21,4	167
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	25,3	63,2	1,8	11,8	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 15 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

Temperatura T [°C]	COMPOUND A 1,5% RTFOT		
	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η	$\log\eta$ [mPa*s]	
60	209000	5,3	0,204
80	19625	4,3	2,04
100	3313	3,5	13,6
120	855	2,9	51
140	303,1	2,5	74,4
160	128	2,1	186
180	63,2	1,8	186

Tabella 16 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

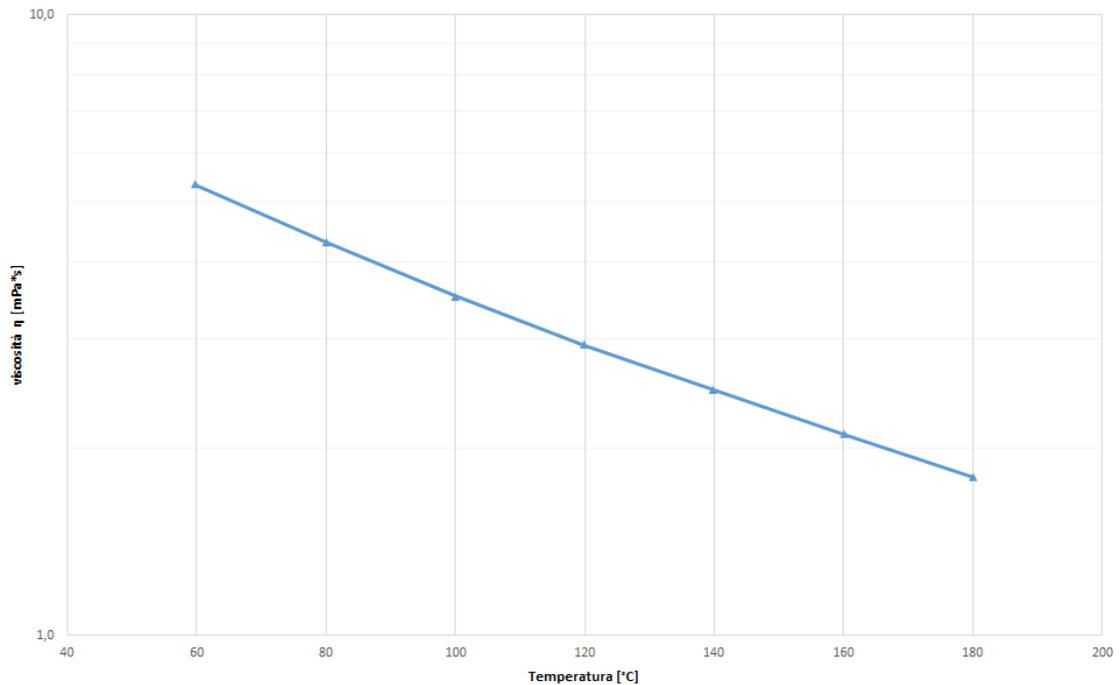


Grafico 12 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 1,5% RTFOT"

3.2.2.2 BITUME COMPOUND A 2,0% RTFOT

Nome		COMPOUND A 2%				
Invecchiamento		RTFOT		Test 1		
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,6	51,5	215000	5,3	43,8	0,204
60	0,5	43,3	216000	5,3	36,8	0,17
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	6	48,5	20208	4,3	41,2	2,04
80	7,5	60	20000	4,3	51	2,55
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	35	47,6	3400	3,5	40,5	11,9
100	40	54,2	3388	3,5	46,1	13,6
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	140	49,1	876,8	2,9	41,7	47,6
120	150	52,4	873,3	2,9	44,5	51
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	80	49,2	307,5	2,5	22,9	74,4
140	90	55,2	306,7	2,5	25,7	83,7
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	200	52,4	131	2,1	24,4	186
160	180	46,8	130	2,1	21,8	167
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	25,9	64,7	1,8	12	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

COMPOUND A 2% RTFOT			
Temperatura T [°C]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	215000	5,3	0,204
80	20208	4,3	2,04
100	3400	3,5	11,9
120	876,8	2,9	47,6
140	307,5	2,5	74,4
160	131	2,1	186
180	64,7	1,8	186

Tabella 18 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

Tabella 17 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

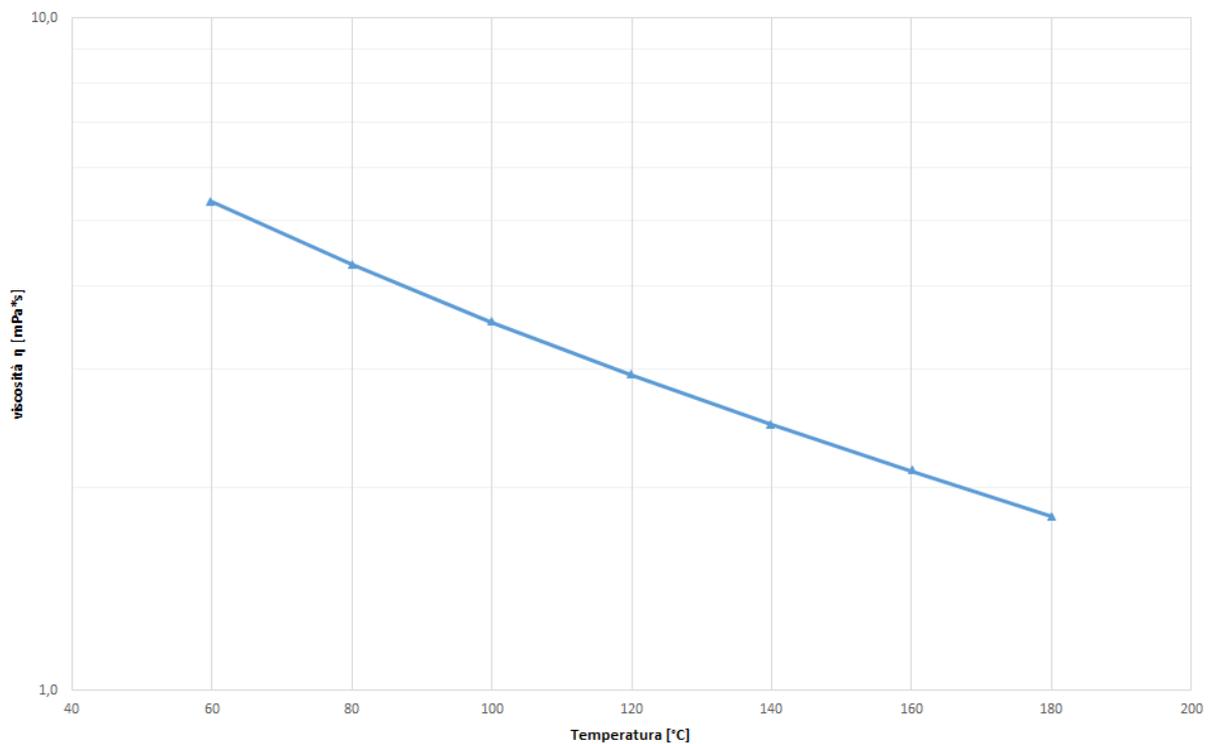


Grafico 13 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 2,0% RTFOT"

3.2.2.3 BITUME COMPOUND A 3,0% RTFOT

Nome		COMPOUND A 3%				
Invecchiamento		RTFOT				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log \eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,5	54,5	272000	5,4	46,3	0,17
60	0,4	43,7	273000	5,4	37,1	0,136
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	5	52	26000	4,4	44,2	1,7
80	4	41,2	25750	4,4	35	1,36
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	25	45,5	4550	3,7	38,7	8,5
100	30	54	4500	3,7	45,9	10,2
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	105	49,1	1169	3,1	41,7	35,7
120	120	55,8	1162	3,1	47,4	40,8
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	70	56	400	2,6	26	65,1
140	60	48	400	2,6	22,3	55,8
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	150	50,4	168	2,2	23,4	139
160	140	46,8	167,1	2,2	21,8	130
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	32,6	81,5	1,9	15,2	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

COMPOUND A 3% RTFOT			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	$\log \eta$	
60	272000	5,4	0,17
80	26000	4,4	1,7
100	4500	3,7	10,2
120	1169	3,1	35,7
140	400	2,6	55,8
160	168	2,2	139
180	81,5	1,9	186

Tabella 20 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

Tabella 19 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

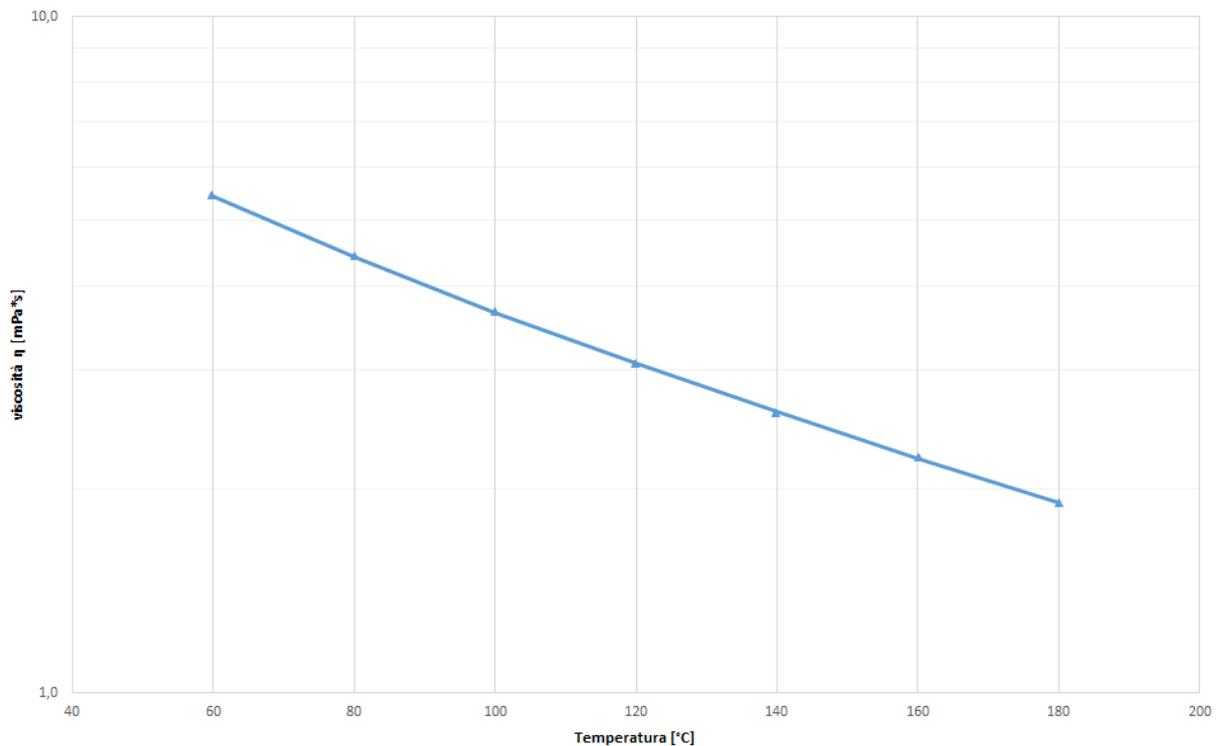


Grafico 14 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 3,0% RTFOT"

3.2.2.4 BITUME COMPOUND A 5,0% RTFOT

Nome		COMPOUND A 5 %				
Invecchiamento		RTFOT		Test 1		
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,5	49,3	247000	5,4	41,9	0,17
60	0,6	59,1	246000	5,4	50,2	0,204
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	5	49,2	24600	4,4	41,8	1,7
80	6	58,4	24333	4,4	49,6	2,04
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	30	52	4333	3,6	44,2	10,2
100	25	43,2	4320	3,6	36,7	8,5
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	120	54,6	1127	3,1	46,4	40,8
120	105	47,5	1131	3,1	40,4	35,7
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	70	55,8	398,3	2,6	25,9	65,1
140	60	47,6	396,7	2,6	22,1	55,8
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	150	50,3	167,7	2,2	23,4	139
160	140	46,9	167,5	2,2	21,8	130
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	32,3	81,3	1,9	15,1	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 21 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

Temperatura T [°C]	COMPOUND A 5% RTFOT		
	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	247000	5,4	0,17
80	24600	4,4	1,7
100	4333	3,6	10,2
120	1131	3,1	35,7
140	396,7	2,6	55,8
160	167,7	2,2	139
180	81,3	1,9	186

Tabella 22 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

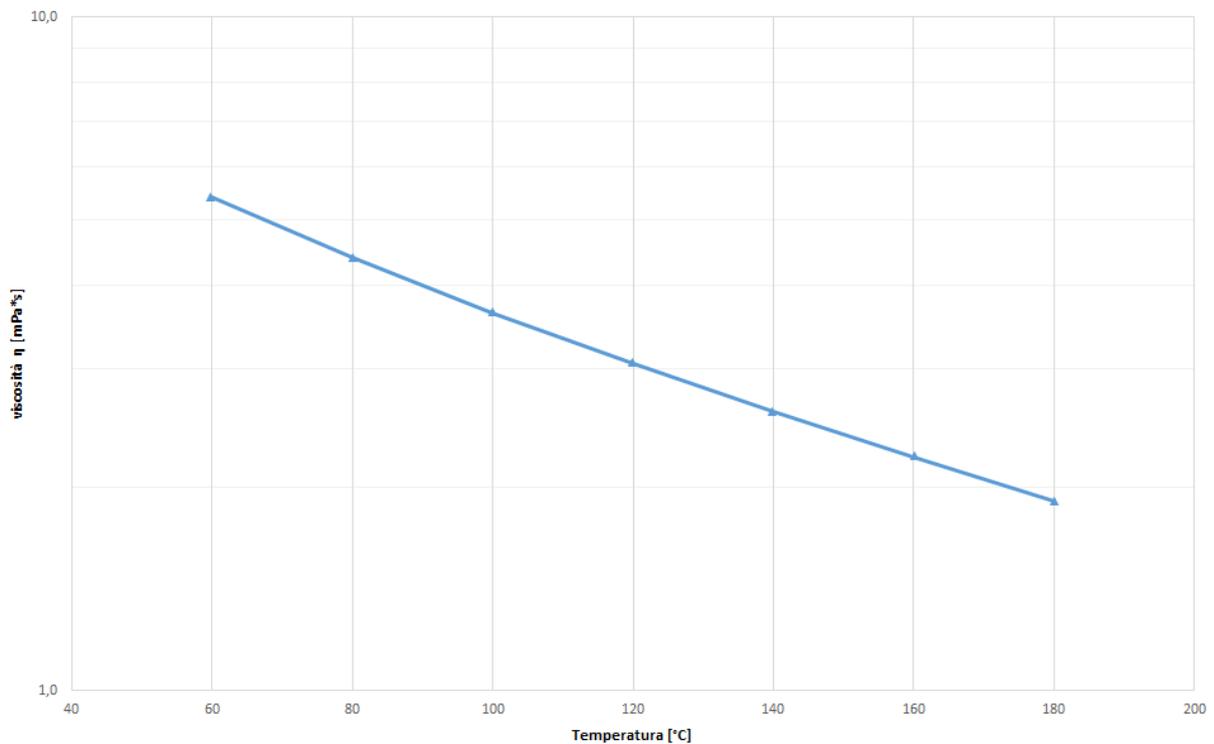


Grafico 15 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 5,0% RTFOT"

3.2.2.5 GRAFICO RIEPILOGATIVO

COMPOUND A RTFOT VISCOSITA'/TEMPERATURA

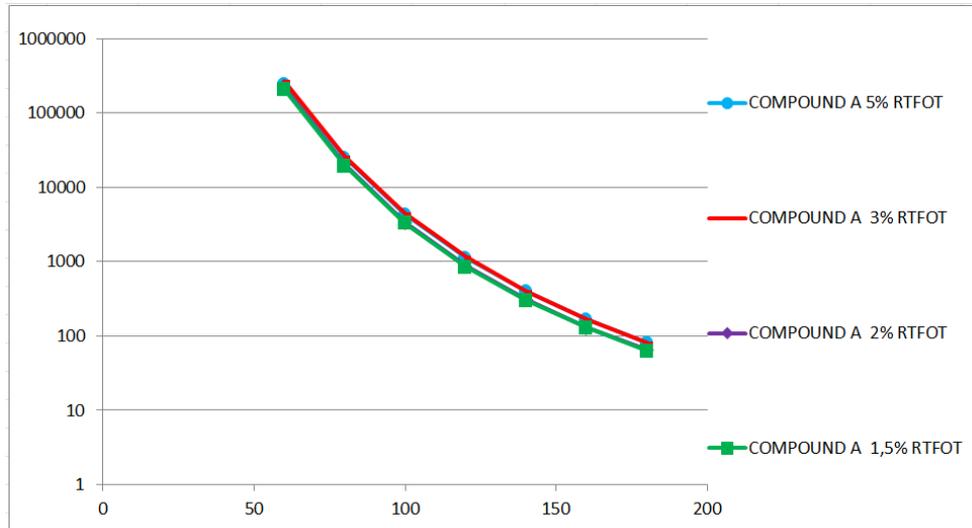


Grafico 16 "Viscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND A RTFOT"

COMPOUND A RTFOT LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

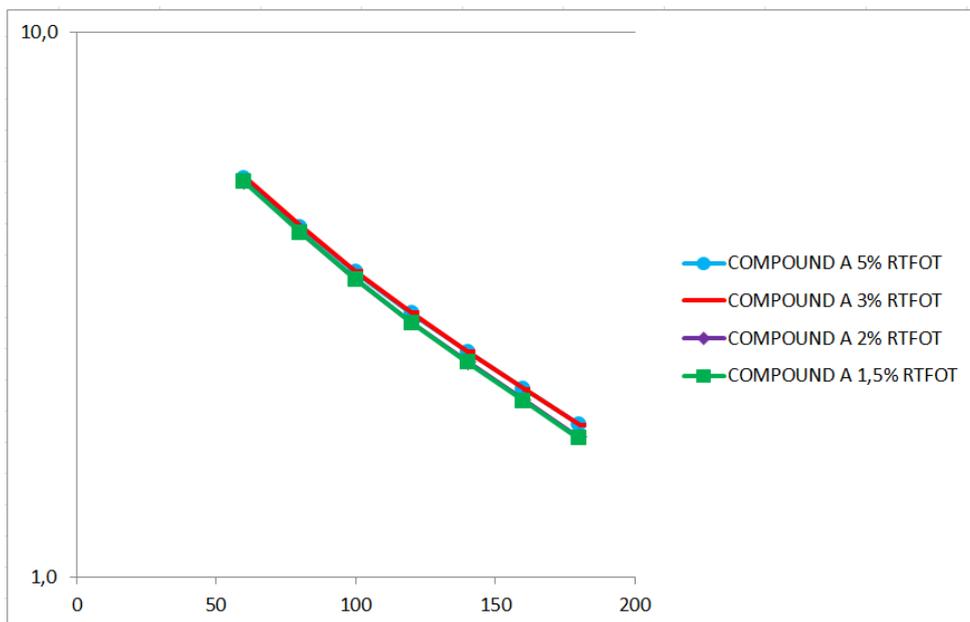


Grafico 17 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND A RTFOT"

Nel [Grafico 16][Grafico 17] sono rappresentate le caratteristiche del bitume COMPOUND A RTFOT ai vari dosaggi di carbon black. Notiamo che i parametri di viscosità sono simili a basse temperature e meno simili ad alte.

3.2.3 BITUME COMPOUND A PAV

3.2.3.1 BITUME COMPOUND A 1,5% PAV

Nome		COMPOUN A 1,5%				
Invecchiamento		PAV				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	logη	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,1	38	950000	6,0	32,3	0,034
60	0,2	74,9	936000	6,0	63,7	0,068
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	2	50,4	63000	4,8	42,8	0,68
80	1,8	45,6	63333	4,8	38,8	0,612
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	15	51,6	8600	3,9	43,9	5,1
100	12	41,3	8604	3,9	35,1	4,08
100			1875	3,3		
100			1871	3,3		
120	70	52,5	756,9	2,9	44,6	23,8
120	60	44,9	751,6	2,9	38,2	20,4
120			571,1	2,8		
120			571,3	2,8		
140	45	51,4	260	2,4	23,9	41,8
140	40	45,7	258,9	2,4	21,3	37,2
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	105	46,4	221	2,3	21,6	97,7
160	120	53,1	221,2	2,3	24,7	112
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	41,3	103,3	2,0	19,2	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 23 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND A 1,5% PAV			
Temperatura T [°C]	Viscosità η [mPa*s]	logη	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	950000	6,0	0,034
80	63000	4,8	0,68
100	8600	3,9	5,1
120	1875	3,3	23,8
140	571,1	2,8	41,8
160	221,2	2,3	112
180	103,3	2,0	186

Tabella 24 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

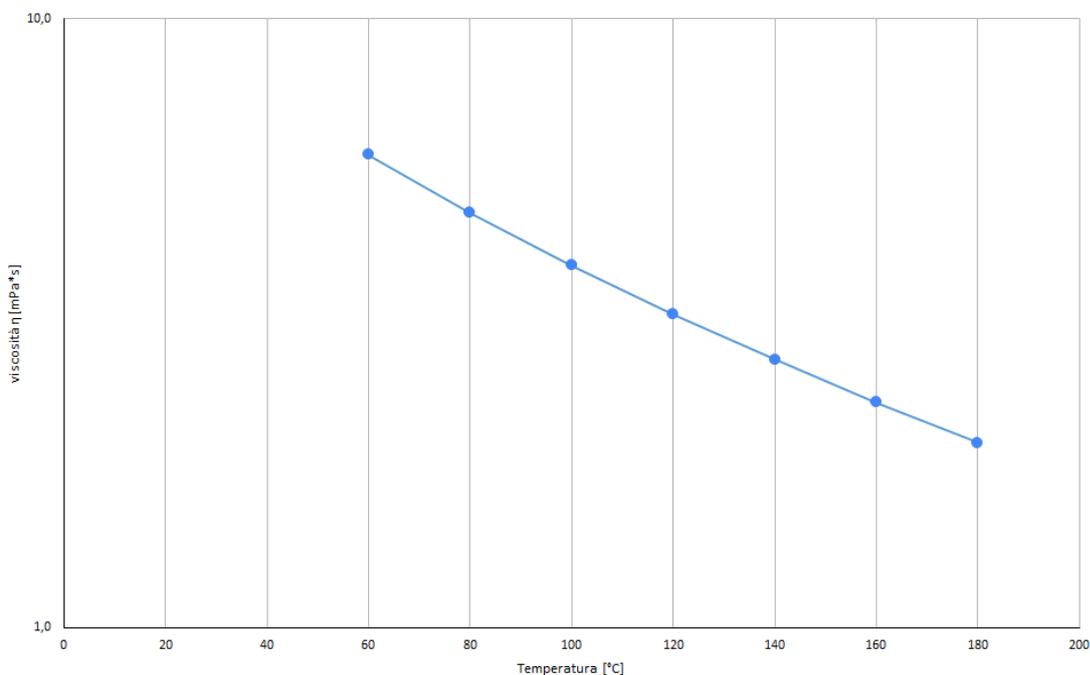


Grafico 18 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 1,5% PAV"

3.2.3.2 BITUME COMPOUND A 2,0% PAV

Nome		COMPOUND A 2%				
Invecchiamento		PAV				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log \eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,1	36,7	918000	6,0	31,2	0,034
60	0,2	72,6	906000	6,0	61,9	0,068
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	2	47,8	59750	4,8	40,6	0,68
80	2,5	59,6	59600	4,8	50,7	0,85
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	15	48,8	8133	3,9	41,5	5,1
100	17	55,2	8118	3,9	46,9	5,78
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	70	50,3	1796	3,3	42,8	23,8
120	60	43,2	1800	3,3	36,7	20,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	50	55,2	552	2,7	25,7	46,5
140	45	49,6	551,1	2,7	23	41,8
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	120	51	212,5	2,3	23,8	112
160	105	44,6	212,4	2,3	20,8	97,7
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	41,6	104	2,0	19,3	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 25 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND A 2% PAV			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η	$\log \eta$	
60	918000	6,0	0,024
80	59750	4,8	0,68
100	8133	3,9	5,1
120	1796	3,3	23,8
140	551,1	2,7	41,8
160	212,5	2,3	112
180	104	2,0	186

Tabella 26 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

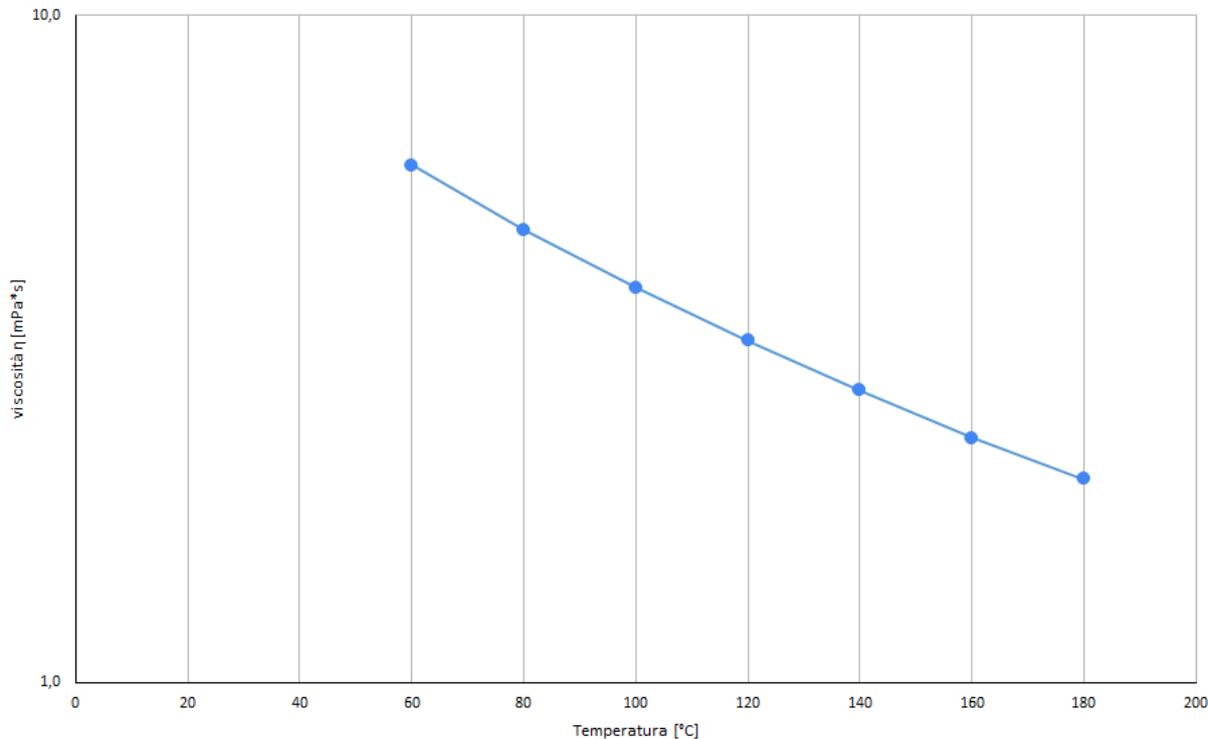


Grafico 19 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 2,0% PAV"

3.2.3.3 BITUME COMPOUND A 3,0% PAV

Nome		COMPOUND A 3%				
Invecchiamento		PAV		Test 1		
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log\eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,1	44,9	1130000	6,1	38,2	0,034
60	0,2	87,2	1090000	6,0	74,1	0,068
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	1,8	53,2	73889	4,9	45,2	0,612
80	1,5	44	73333	4,9	37,4	0,51
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	15	54,8	9133	4,0	46,6	5,1
100	12	43,8	9125	4,0	37,2	4,08
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	70	53,3	1904	3,3	45,3	23,8
120	60	45,7	1904	3,3	38,8	20,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	200	45,3	566,2	2,8	38,5	68
140	45	52	577,8	2,8	24,2	41,8
140	40	46,2	577,5	2,8	21,5	37,2
140				#NUM!		
160	105	46,1	219,5	2,3	21,4	97,7
160	120	52,7	219,6	2,3	24,5	112
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	42,6	106,5	2,0	19,8	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 27 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND A 3% PAV			
Temperatura T [°C]	Viscosità η [mPa*s]	$\log\eta$	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	1130000	6,1	0,034
80	73889	4,9	0,612
100	9133	4,0	5,1
120	1904	3,3	23,8
140	577,8	2,8	41,8
160	219,6	2,3	112
180	106,5	2,0	186

Tabella 28 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

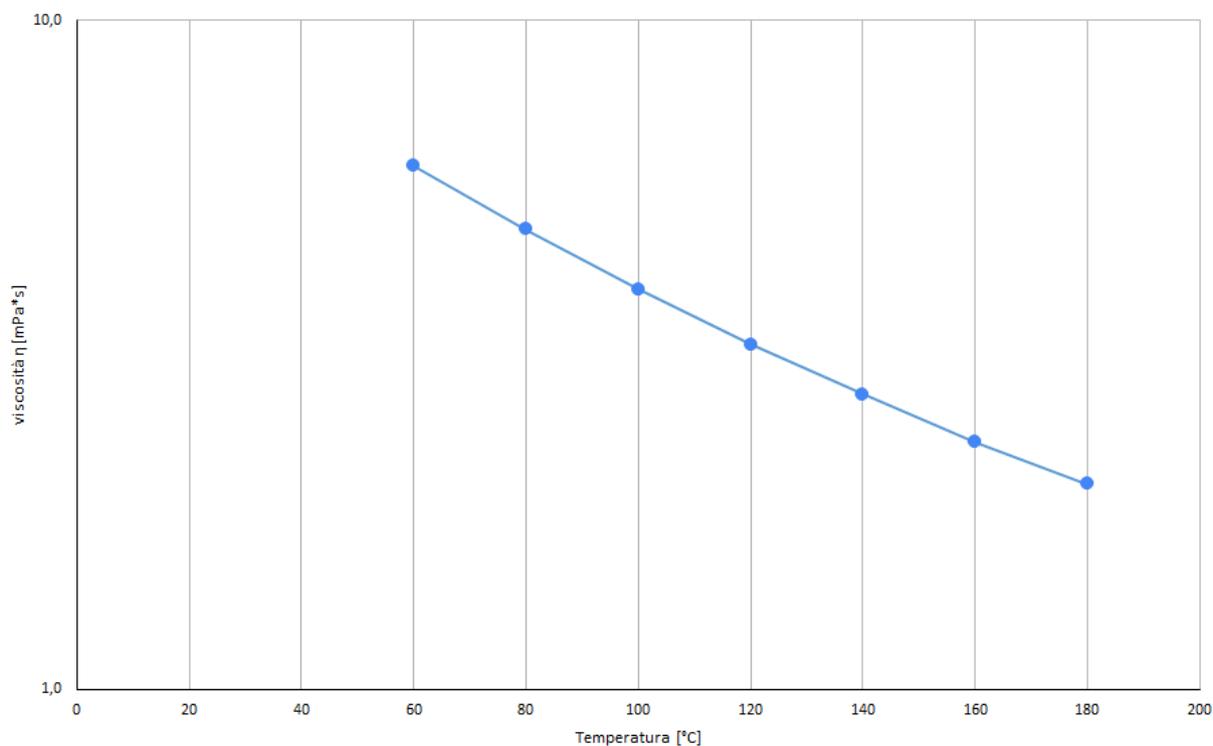


Grafico 20 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 3,0% PAV"

3.2.3.4 BITUME COMPOUND A 5,0% PAV

Nome		COMPOUND A 5%				
Invecchiamento		PAV		Test 1		
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log\eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,1	36,5	913000	6,0	31	0,034
60	0,2	71,3	891000	5,9	60,6	0,068
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	2	49,4	61750	4,8	42	0,68
80	2,5	61,8	61800	4,8	52,5	0,85
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	15	49,8	8300	3,9	42,3	5,1
100	17	56,3	8279	3,9	47,9	5,78
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	70	50,7	1811	3,3	43,1	23,8
120	60	43,4	1808	3,3	36,9	20,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	200	43,9	548,8	2,7	37,3	68
140	45	51	566,7	2,8	23,7	41,8
140	40	45,2	565	2,8	21	37,2
140				#NUM!		
160	120	52,5	218,7	2,3	24,4	112
160	105	45,8	218,1	2,3	21,3	97,7
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	105,8	42,3	1,6	19,7	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 29 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

Temperatura T [°C]	COMPOUND A 5% PAV		
	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	$\log\eta$	
60	913000	6,0	0,034
80	61750	4,8	0,68
100	8300	3,9	5,1
120	1811	3,3	23,8
140	566,7	2,8	41,8
160	218,7	2,3	112
180	105,8	2,0	186

Tabella 30 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% "

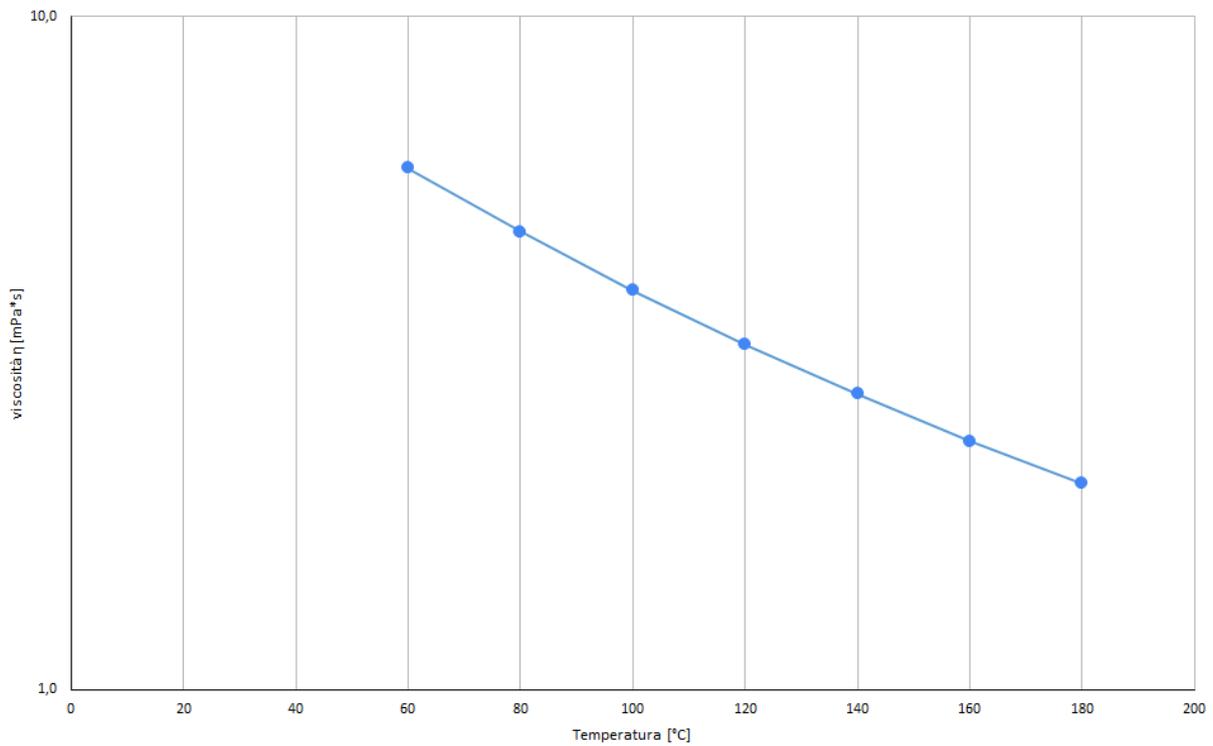


Grafico 21 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND A 5,0% PAV"

3.2.3.5 GRAFICO RIEPILOGATIVO

BITUME COMPOUND A PAV VISCOSITA'/TEMPERATURA

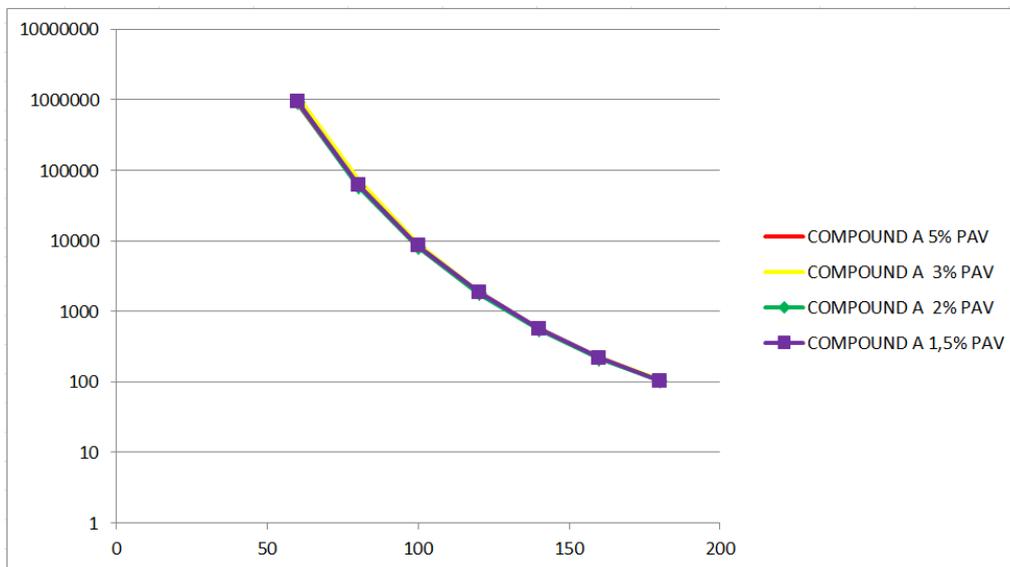


Grafico 22 "Viscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND A PAV"

BITUME COMPOUND A PAV LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

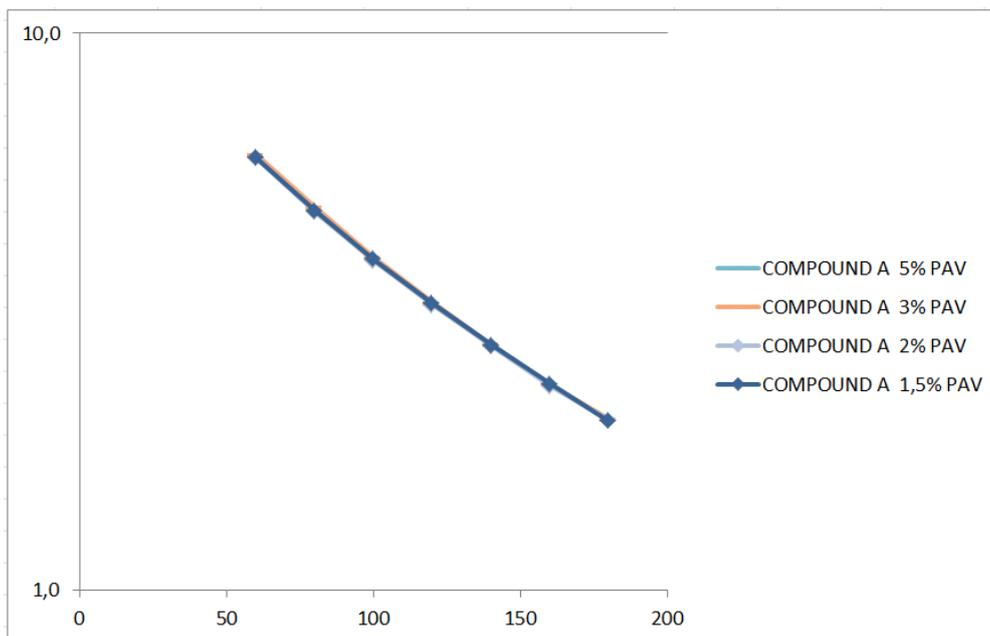


Grafico 23 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND A PAV"

Nel [Grafico 22][Grafico 23] sono rappresentate le caratteristiche del bitume COMPOUND A PAV ai vari dosaggi di carbon black. Notiamo che i parametri di viscosità sono molto simili tra di loro.

3.3 BITUME COMPOUND B

3.3.1 BITUME COMPOUND B NO AGE

3.3.1.1. BITUME COMPOUND B 0,02% NO AGE

Nome		COMPOUND B 0,02%				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	logη	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,8	48	150000	5,2	40,8	0,272
60	0,9	54	150000	5,2	45,9	0,306
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	7,5	41,6	13867	4,1	35,4	2,55
80	10	54,6	13675	4,1	46,4	3,4
80	8	43,8	13687	4,1	37,2	2,72
80				#NUM!		
100	60	56,6	2358	3,4	48,1	20,4
100	50	47,1	2355	3,4	40	17
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	180	44,2	613,9	2,8	37,6	61,2
120	200	48,9	611,3	2,8	41,6	68
120	40	51,5	643	2,8	24	37,2
120	35	45,1	644,3	2,8	21	32,5
140	105	47	223,8	2,3	21,9	97,7
140	120	53,6	223,3	2,3	25	112
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	200	38,6	96,5	2,0	17,9	186
160				#NUM!		
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	20,1	50,3	1,7	9,35	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 31 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

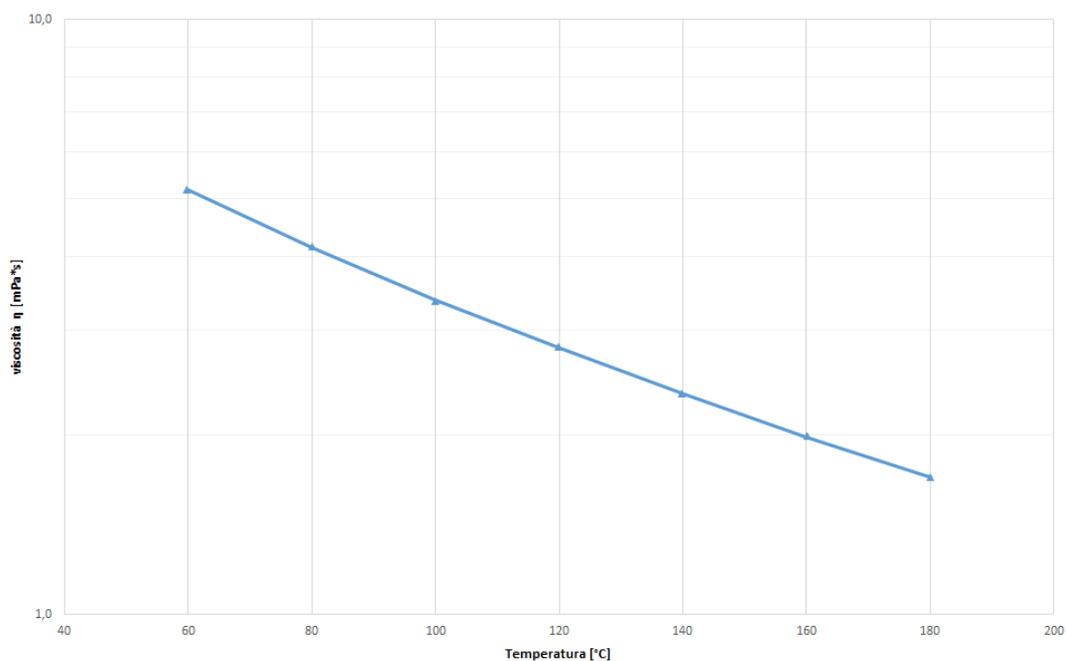


Gráfico 24 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 0,02% NO AGE"

COMPOUND B 0,02% NO AGE			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	logη	
60	150000	5,2	0,272
80	13675	4,1	3,4
100	2355	3,4	17
120	643	2,8	68
140	223,8	2,3	97,7
160	96,5	2,0	186
180	50,3	1,7	186

Tabella 32 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

3.3.1.2 BITUME COMPOUND B 0,10% NO AGE

Nome		COMPOUND B 0,1%				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,5	53,9	268000	5,4	45,6	0,17
60	0,4	43	269000	5,4	36,5	0,136
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	2	22,9	28625	4,5	19,4	0,68
80	5	54,6	27300	4,4	46,4	1,7
80	4	43,6	27250	4,4	37,1	1,36
80				#NUM!		
100	25	48,3	4830	3,7	41,1	8,5
100	30	57,4	4783	3,7	48,8	10,2
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	100	50,7	1268	3,1	43,1	34
120	80	40,1	1253	3,1	34,1	27,2
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	60	51,8	431,7	2,6	24,1	55,8
140	50	43	430	2,6	20	46,5
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	135	48,1	178,1	2,3	22,4	126
160	140	49,6	177,1	2,2	23,1	130
160	150	52,8	176	2,2	24,6	139
160				#NUM!		
180	200	34,7	86,8	1,9	16,1	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 33 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

Temperatura T [°C]	COMPOUND B 0,1% NO AGE		
	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	268000	5,4	0,17
80	27300	4,4	1,7
100	4830	3,7	8,5
120	1268	3,1	34
140	431,7	2,6	55,8
160	177,1	2,2	130
180	86,8	1,9	186

Tabella 34 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

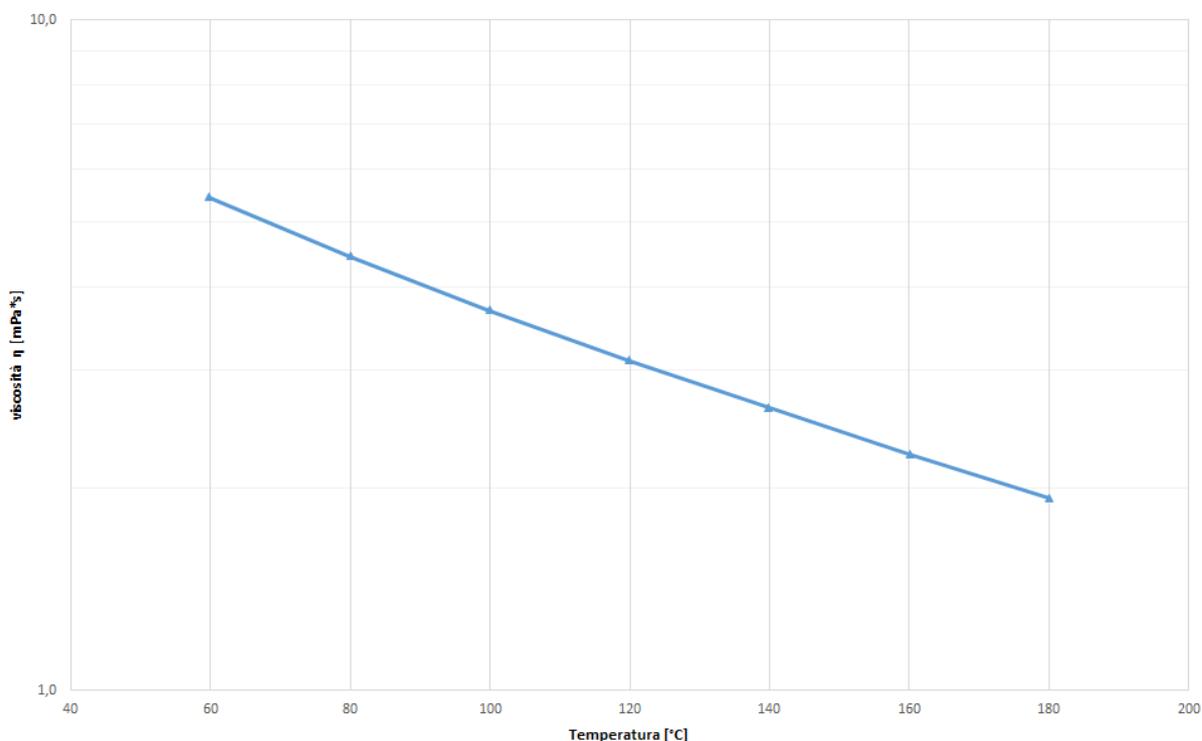


Gráfico 25 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 0,10% NO AGE"

3.3.1.3 BITUME COMPOUND B 1,00% NO AGE

Nome		COMPOUND B 1% S27				
Invecchiamento		NO AGE				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60*	0,03*	33,1*	5520000	6,7	46,3*	0,008*
60*	0,05*	52,2*	5200000	6,7	73,1*	0,014*
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	0,2	41	500000	5,7	34	0,068
80	0,3	55,9	466000	5,7	47,5	0,102
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	1,8	50	69444	4,8	42,5	0,612
100	1,5	41,8	69667	4,8	35,5	0,51
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	8	47,5	14844	4,2	40,4	2,72
120	10	57,3	14325	4,2	48,7	3,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	30	53,1	4425	3,6	45,1	10,2
140	25	44,8	4480	3,7	38,1	8,5
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	70	48,2	1721	3,2	41	23,8
160	75	51,2	1707	3,2	43,5	25,5
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	160	45,7	714,1	2,9	38,8	54,4
180	180	50,7	704,2	2,8	43,1	61,2
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 35 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND B 1% NO AGE S27		
η	Viscosità log η	Shear Rate SR
	[mPa*s]	[s ⁻¹]
5200000	6,7	0,014
466000	5,7	0,102
69444	4,8	0,612
14844	4,2	2,72
4425	3,6	10,2
1707	3,2	25,5
704,2	2,8	61,2

Tabella 36 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

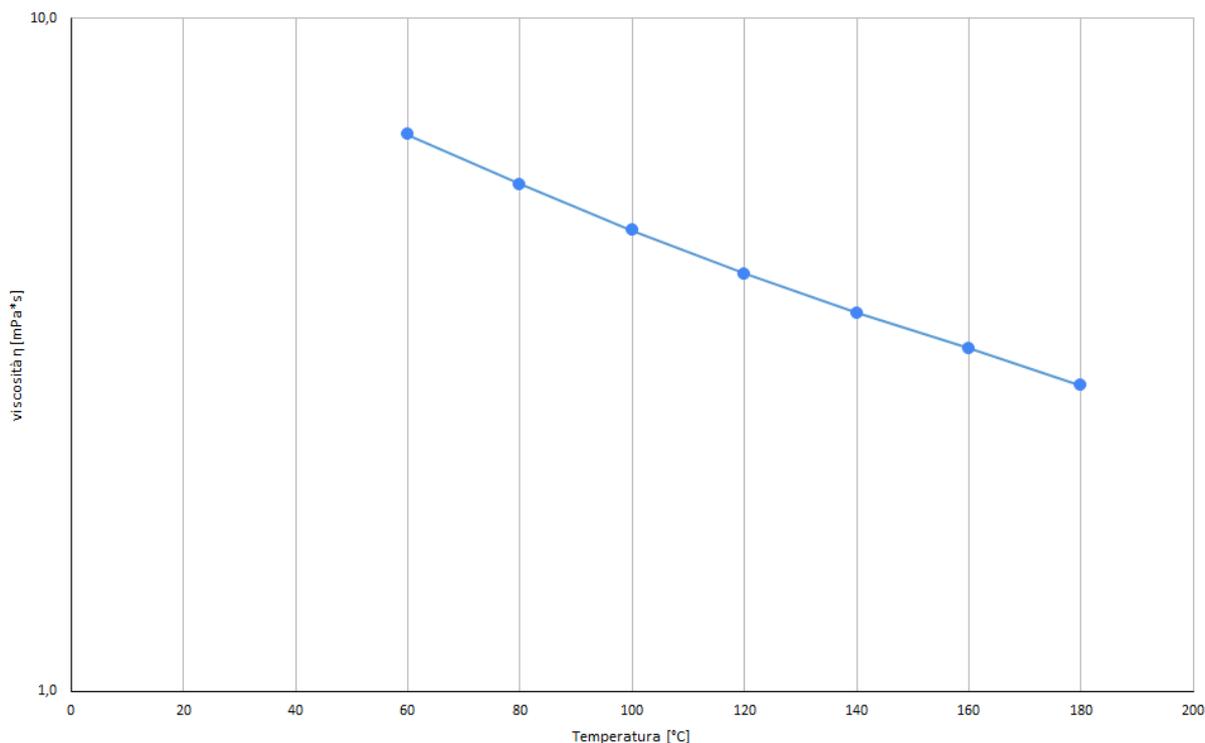


Grafico 26 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 1,00% NO AGE"

3.3.1.4 GRAFICI DI RIEPILOGO

BITUME COMPOUND B NO AGE VISCOSITA'/TEMPERATURA

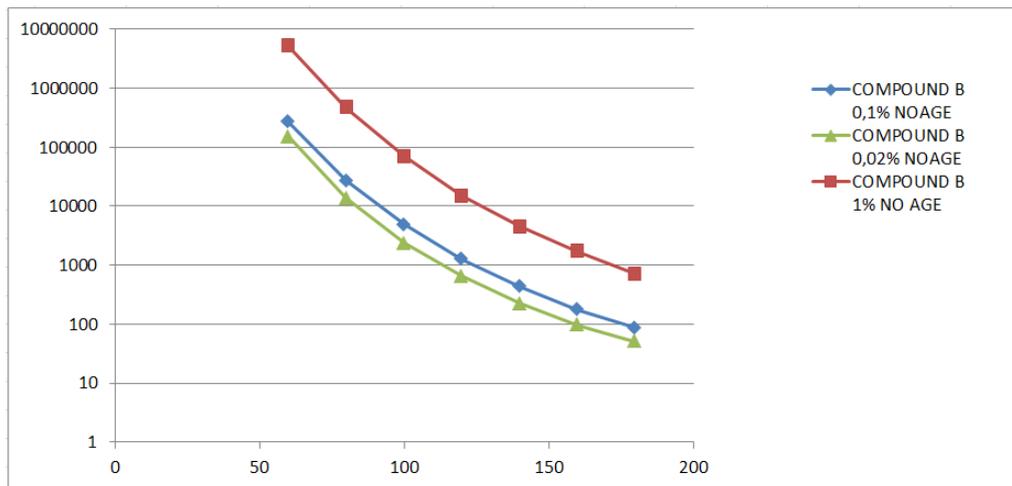


Grafico 27 "Viscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND B NO AGE"

BITUME COMPOUND B NO AGE LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

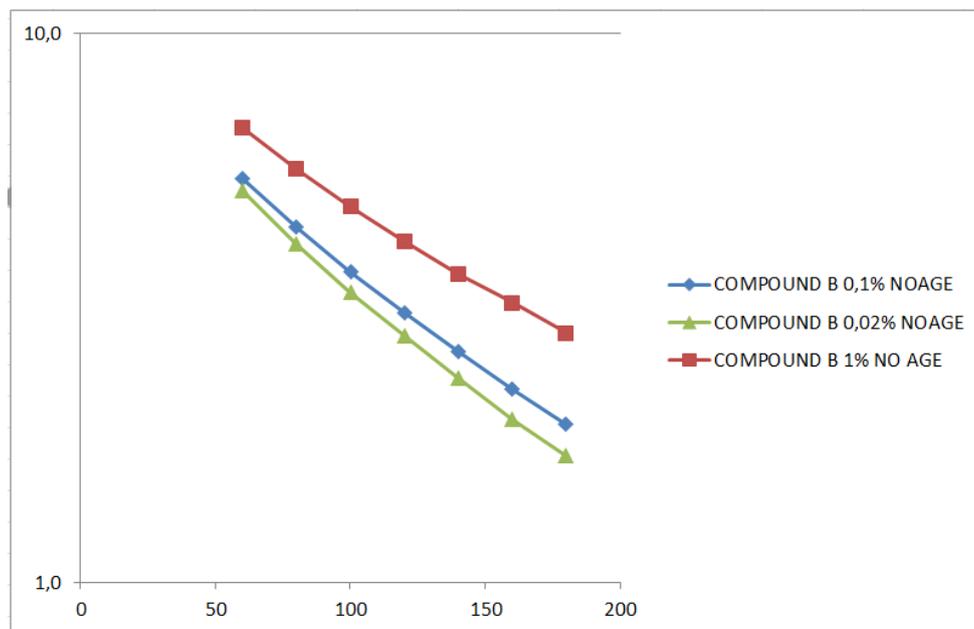


Grafico 28 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND B NO AGE"

Nel [Grafico 27][Grafico 28] sono rappresentate le caratteristiche del bitume COMPOUND B NO AGE ai vari dosaggi di grafene. Notiamo che la viscosità aumenta con il dosaggio di grafene ed è più evidente ad alte temperature.

3.3.2 BITUME COMPOUND B RTFOT

3.3.2.1 BITUME COMPOUND B 0,02% RTFOT

Nome		COMPOUND B 0,02%				
Invecchiamento		RTFOT				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log \eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,5	48,8	242000	5,4	441,1	0,17
60	0,6	56,8	237000	5,4	48,3	0,204
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	4	35,8	22375	4,3	30,4	1,36
80	6	53	22083	4,3	45,1	2,04
80	5	44	22000	4,3	37,4	1,7
80				#NUM!		
100	30	44,8	3733	3,6	38,1	10,2
100	35	51,5	3679	3,6	43,8	11,9
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	120	45,7	952,1	3,0	38,8	40,8
120	135	51	944,4	3,0	43,4	45,9
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	80	52,8	330	2,5	24,6	74,4
140	75	49,4	329,3	2,5	23	69,7
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	160	43,8	136,9	2,1	20,4	149
160	200	54,3	135,5	2,1	25,3	186
160	180	49	136,1	2,1	22,8	167
160				#NUM!		
180	200	26,8	67	1,8	12,5	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 37 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND B 0,02% RTFOT			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η	$\log \eta$	
60	242000	5,4	0,17
80	22083	4,3	2,04
100	3679	3,6	11,9
120	944,4	3,0	45,9
140	329,3	2,5	69,7
160	136,1	2,1	167
180	67	1,8	186

Tabella 38 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% "

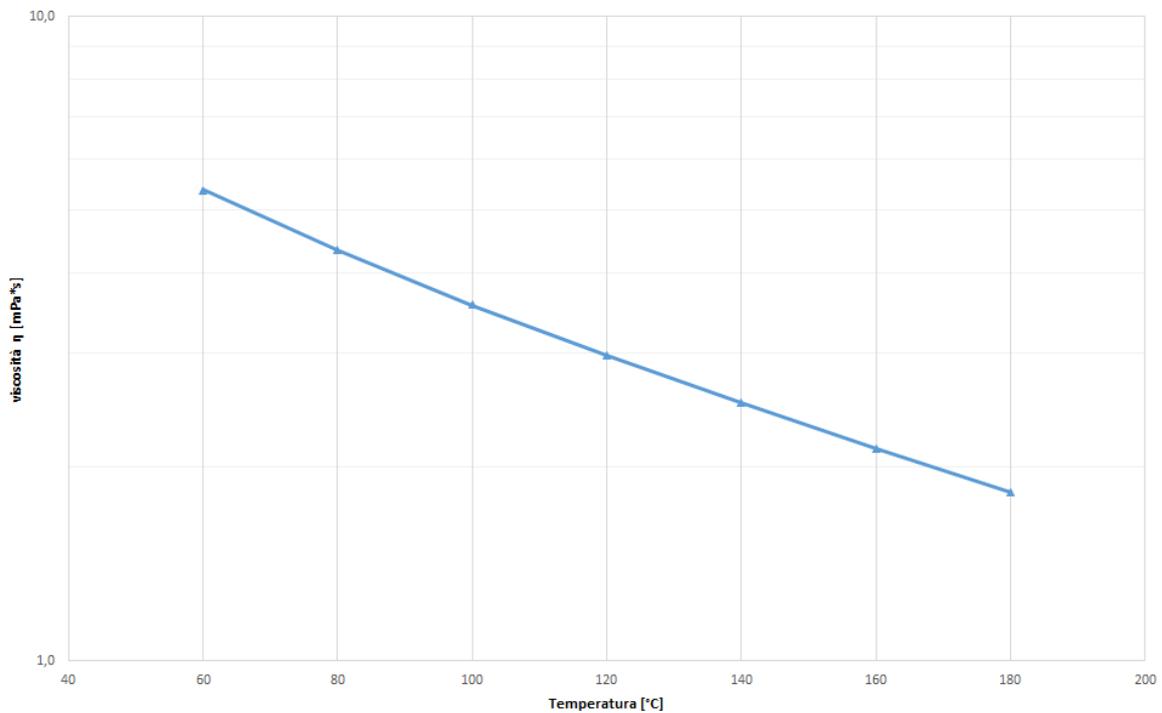


Grafico 29 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 0,02% RTFOT"

3.3.2.2 BITUME COMPOUND B 0,10% RTFOT

Nome		COMPOUND B 0,1%				
Invecchiamento		RTFOT				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	logη	Shear Stress SS [N/m²]	Shear Rate SR [s⁻¹]
60	0,3	40	338000	5,5	33,9	0,102
60	0,4	53,3	333000	5,5	45,3	0,136
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	2,5	29,5	29500	4,5	25,1	0,85
80	4	46,8	29250	4,5	39,9	1,36
80	5	58,3	29150	4,5	49,6	1,7
80				#NUM!		
100	25	43,9	4390	3,6	37,3	8,5
100	30	52,5	4375	3,6	44,6	10,2
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	45	19,8	1100	3,0	16,8	15,3
120	75	33	1100	3,0	28	25,5
120	120	52,8	1100	3,0	44,9	40,8
120				#NUM!		
140	50	39	390	2,6	18,1	46,5
140	70	54,2	387,1	2,6	25,3	65,1
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	70	22,5	160,7	2,2	10,4	65,1
160	150	47,9	159,7	2,2	22,3	138
160	160	50,7	158,4	2,2	23,6	149
160				#NUM!		
180	200	31,5	78,8	1,9	14,6	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 39 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND B 0,1% RTFOT			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s⁻¹]
	η [mPa*s]	logη	
60	333000	5,5	0,136
80	29250	4,5	1,36
100	4375	3,6	10,2
120	1100	3,0	40,8
140	387,1	2,6	65,1
160	158,4	2,2	149
180	78,8	1,9	186

Tabella 40 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

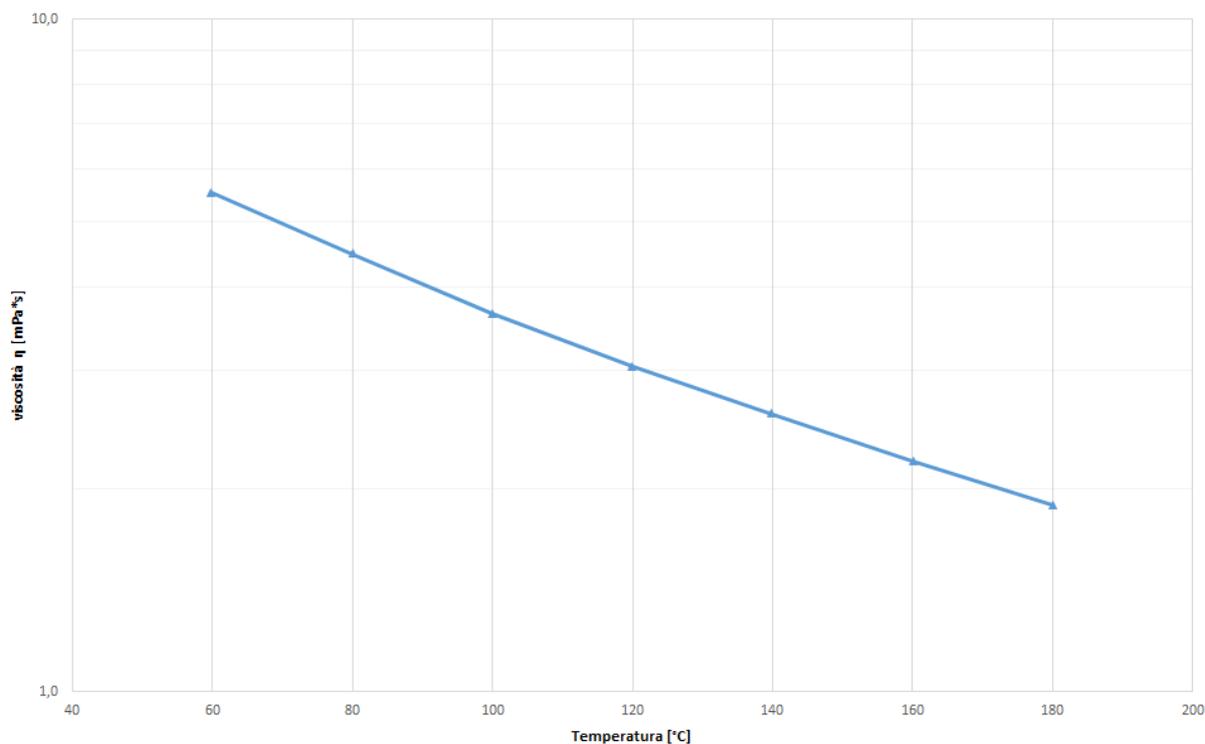


Grafico 30 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 0,10% RTFOT"

3.3.2.3 GRAFICI DI RIEPILOGO

BITUME COMPOUND B RTFOT VISCOSITA'/TEMPERATURA

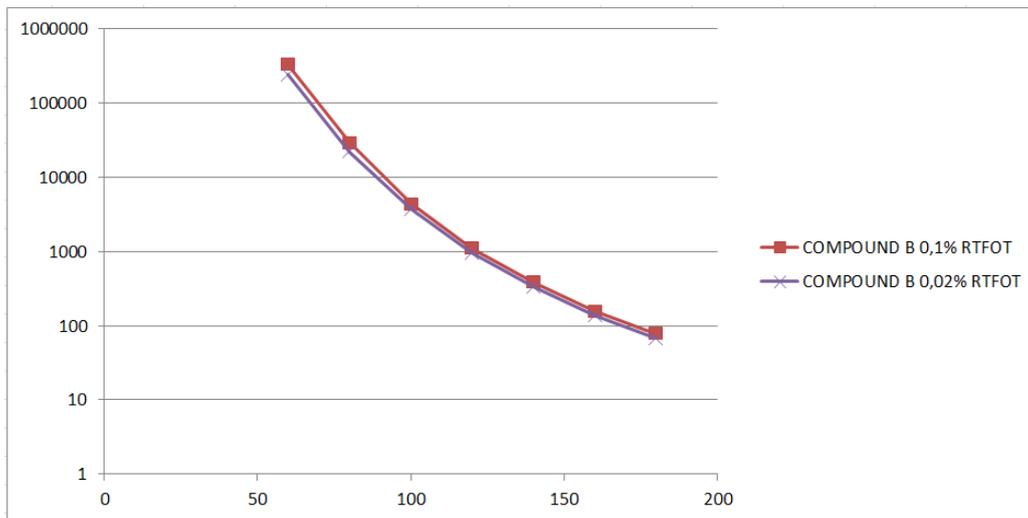


Grafico 31 "Viscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND B RTFOT"

BITUME COMPOUND B RTFOT LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

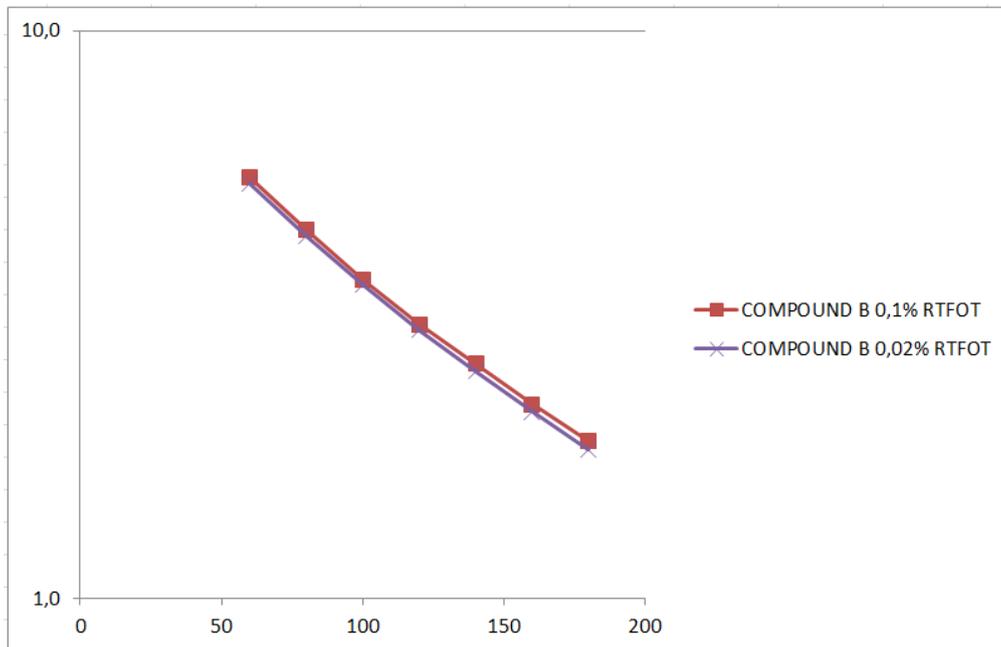


Grafico 32 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND B RTFOT"

Nel [Grafico 31][Grafico 32] sono rappresentate le caratteristiche del bitume COMPOUND B RTFOT ai vari dosaggi di grafene. Notiamo che la viscosità aumenta con il dosaggio di grafene.

3.3.3 BITUME COMPOUND B PAV

3.3.3.1 BITUME COMPOUND B 0,02% PAV

Nome		COMPOUND B 0,02%				
Invecchiamento		PAV				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	$\log \eta$	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,1	52,7	1320000	6,1	44,8	0,034
60	0,09	48,3	1340000	6,1	41,1	0,031
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	1,8	55,5	77083	4,9	47,2	0,612
80	1,5	46,3	77167	4,9	39,4	0,51
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	15	58,2	9700	4,0	49,5	5,1
100	12	46,3	9646	4,0	39,4	4,08
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	70	55,2	1971	3,3	46,9	23,8
120	60	47,3	1971	3,3	40,2	20,4
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	200	46,3	578,7	2,8	39,4	68
140	45	51,8	575,6	2,8	24,1	41,8
140	40	46	575	2,8	21,3	37,2
140				#NUM!		
160	120	51,8	215,8	2,3	24	112
160	105	45,3	215,7	2,3	21,1	97,7
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	39,2	98	2,0	18,2	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 41 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND B 0,02% PAV			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	$\log \eta$	
60	1340000	6,1	0,031
80	77167	4,9	0,51
100	9646	4,0	4,08
120	1971	3,3	20,4
140	575,6	2,8	41,8
160	215,8	2,3	112
180	98	2,0	186

Tabella 42 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% "

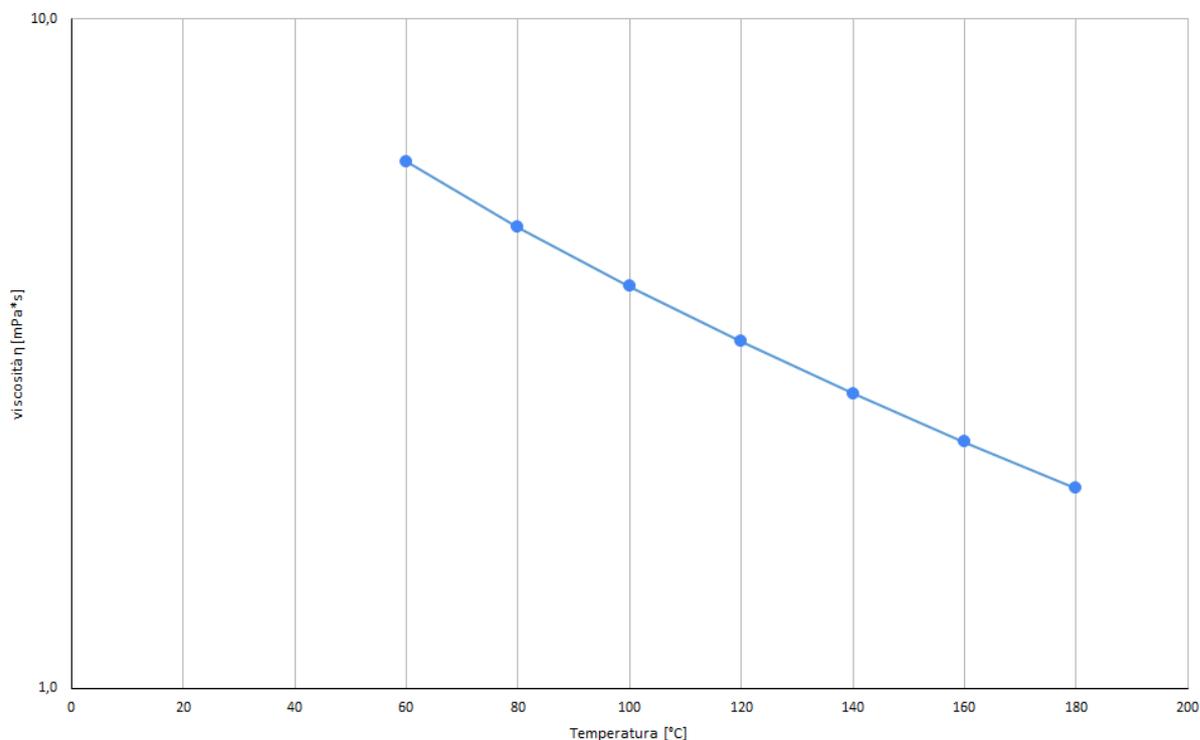


Grafico 33 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 0,02% PAV"

3.3.3.2 BITUME COMPOUND B 0,10% PAV

Nome		COMPOUND B 0,1%				
Invecchiamento		PAV				
Test 1						
Temperatura T [°C]	Velocità angolare ω [RPM]	Sforzo Torcente μ [%]	Viscosità η [mPa*s]	log η	Shear Stress SS [N/m ²]	Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	0,07	46,5	1660000	6,2	39,5	0,024
60	0,09	59,4	1650000	6,2	50,5	0,031
60				#NUM!		
60				#NUM!		
80	1,4	54,4	97143	5,0	46,1	0,476
80	1,2	46,5	96667	5,0	39,5	0,408
80				#NUM!		
80				#NUM!		
100	12	56,7	11812	4,1	48,1	4,08
100	10	47,1	11775	4,1	40,1	3,4
100				#NUM!		
100				#NUM!		
120	60	58,1	2421	3,4	49,4	20,4
120	50	48,5	2425	3,4	41,2	17
120				#NUM!		
120				#NUM!		
140	180	50,4	700	2,8	42,8	61,2
140	160	44,8	700	2,8	38,1	54,4
140				#NUM!		
140				#NUM!		
160	100	51,8	259	2,4	24,1	93
160	90	46,6	258,9	2,4	21,7	83,7
160				#NUM!		
160				#NUM!		
180	200	46	115	2,1	21,4	186
180				#NUM!		
180				#NUM!		
180				#NUM!		

Tabella 43 "Dati rilevati da Rotoviscosimetro Brookfield"

COMPOUND B 0,1% PAV			
Temperatura T [°C]	Viscosità		Shear Rate SR [s ⁻¹]
	η [mPa*s]	log η	
60	1660000	6,2	0,024
80	96667	5,0	0,408
100	11775	4,1	3,4
120	2425	3,4	17
140	700	2,8	61,2
160	259	2,4	93
180	115	2,1	186

Tabella 44 " Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50%"

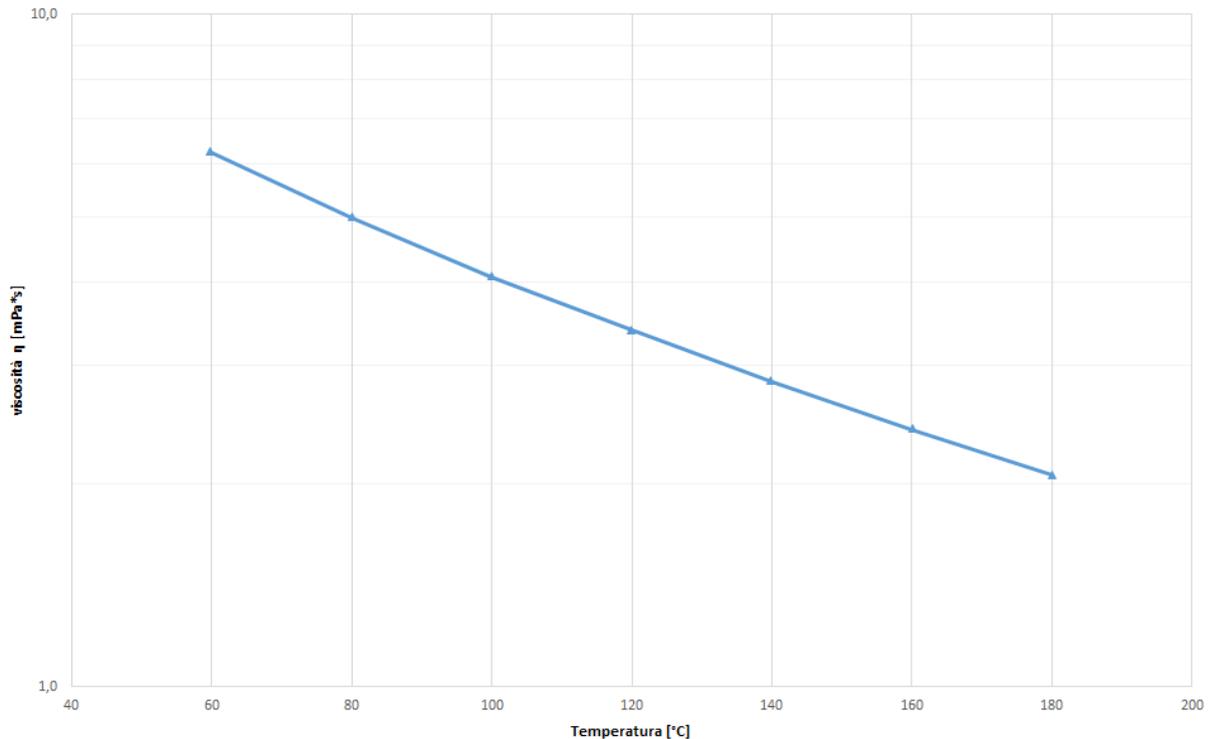


Grafico 34 "Viscosità-Temperatura per bitume COMPOUND B 0,10% PAV"

3.3.3.3 GRAFICI DI RIEPILOGO

BITUME COMPOUND B PAV VISCOSITA'/TEMPERATURA

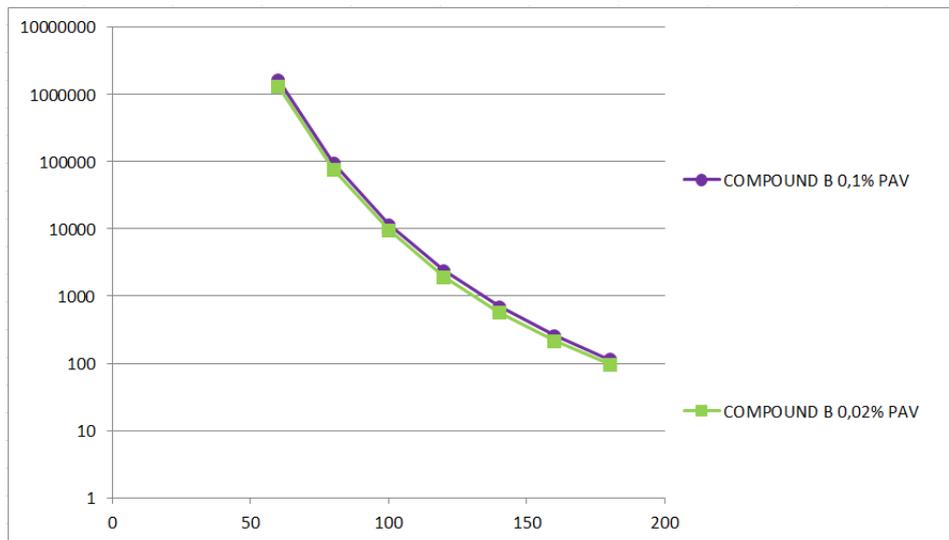


Grafico 35 "Viscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND B PAV"

BITUME COMPOUND B PAV LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

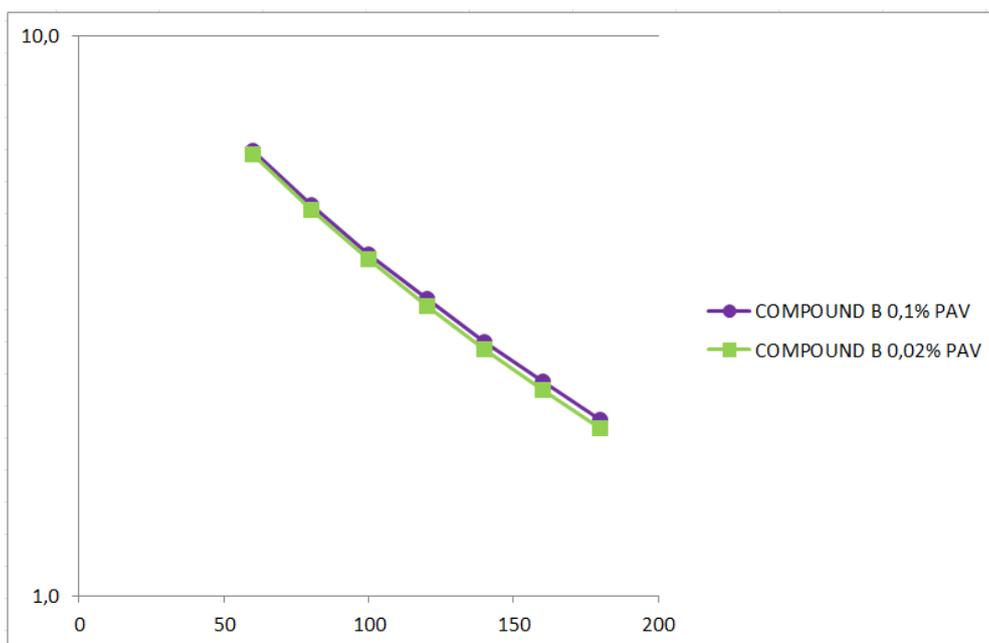


Grafico 36 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi COMPOUND B PAV"

Nel[Grafico 35][Grafico 36] sono rappresentate le caratteristiche del bitume COMPOUND B PAV ai vari dosaggi di grafene. Maggiori percentuali di grafene mi danno maggiori valori di viscosità.

3.4 GRAFICI DI RIEPILOGO PER TUTTI I BITUMI NO AGE BITUMI NO AGE VISCOSITA'/TEMPERATURA

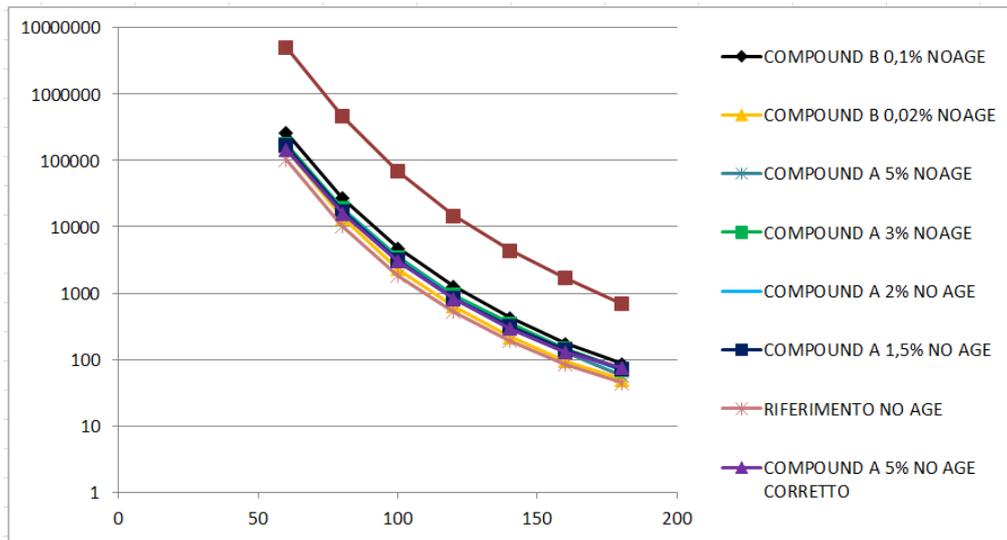


Grafico 37 "Viscosità-Temperatura per i bitumi NO AGE"

BITUMI NO AGE LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

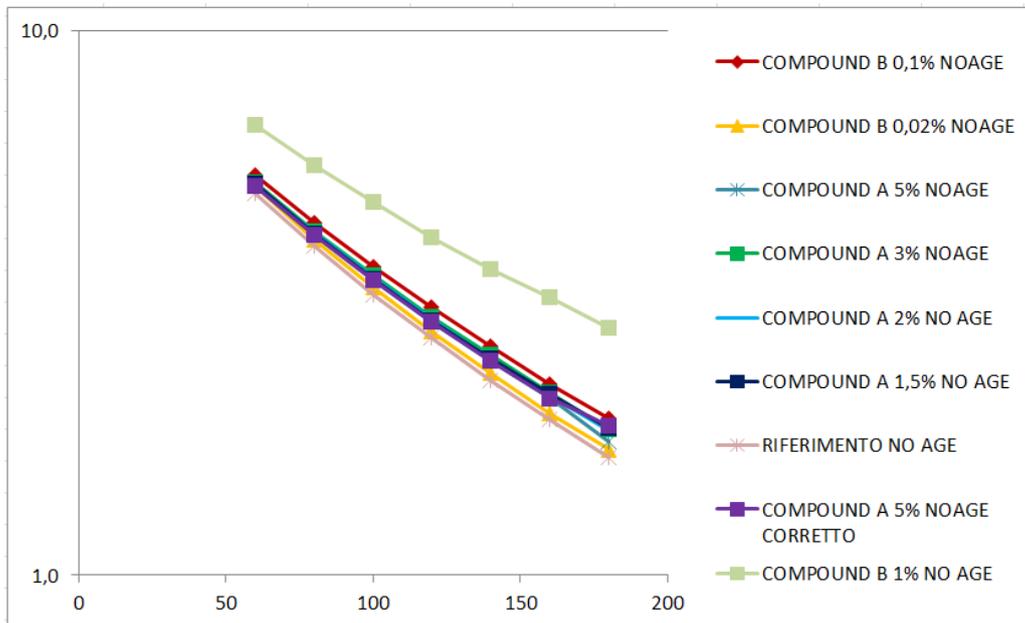


Grafico 38 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi NO AGE"

Nel [Grafico 37],[Grafico 38] sono rappresentate le caratteristiche di tutti i bitumi NO AGE. Si osserva che il bitume più viscoso è il COMPOUND B 1%.

3.5 GRAFICI RI RIEPILOGO PER TUTTI I BITUMI INVECCHIATI CON RTFOT

BITUMI RTFOT LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA

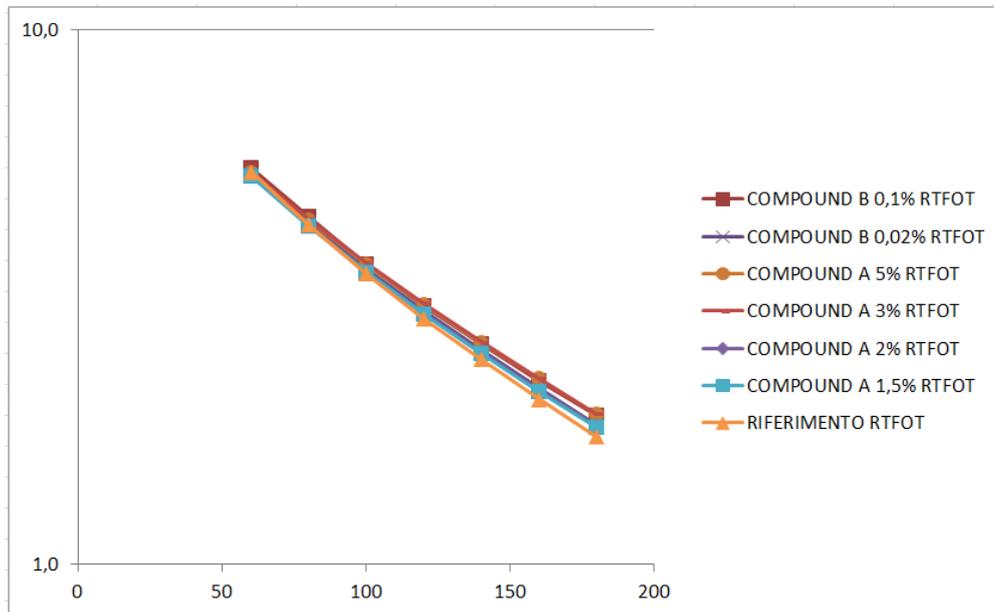


Grafico 39 "LogViscosità-Temperatura per i bitumi RTFOT"

BITUMI RTFOT VISCOSITA'/TEMPERATURA

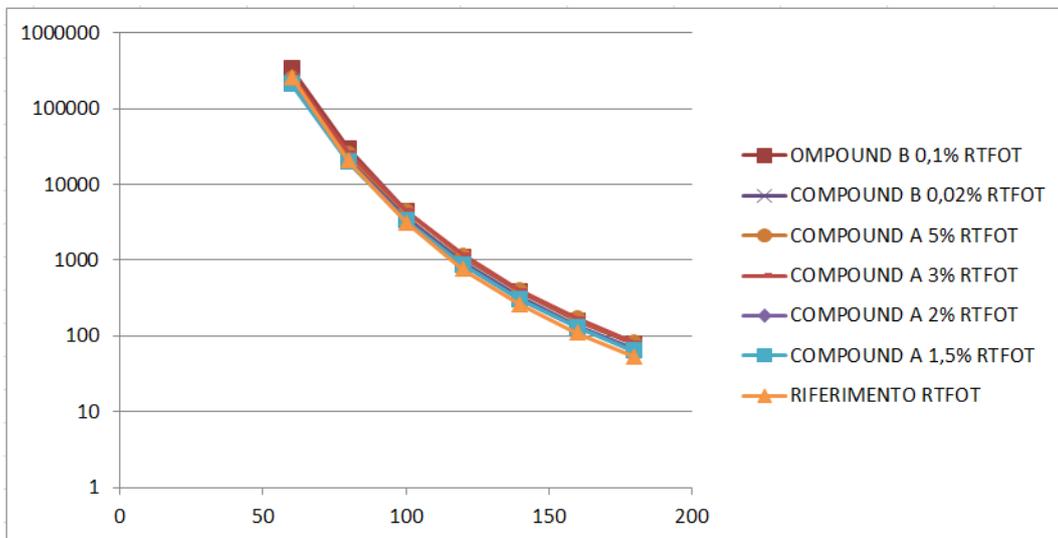
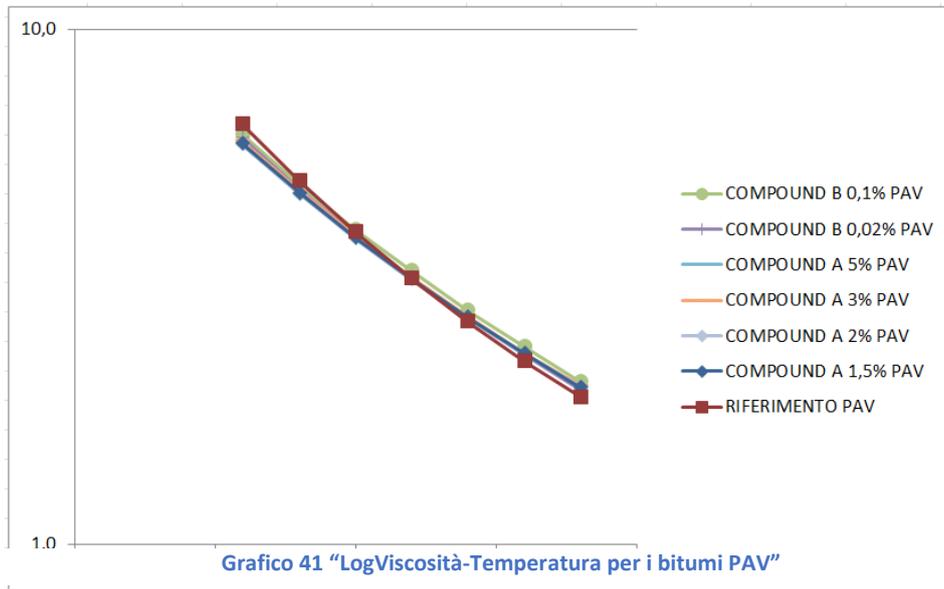


Grafico 40 "Viscosità-Temperatura per i bitumi RTFOT"

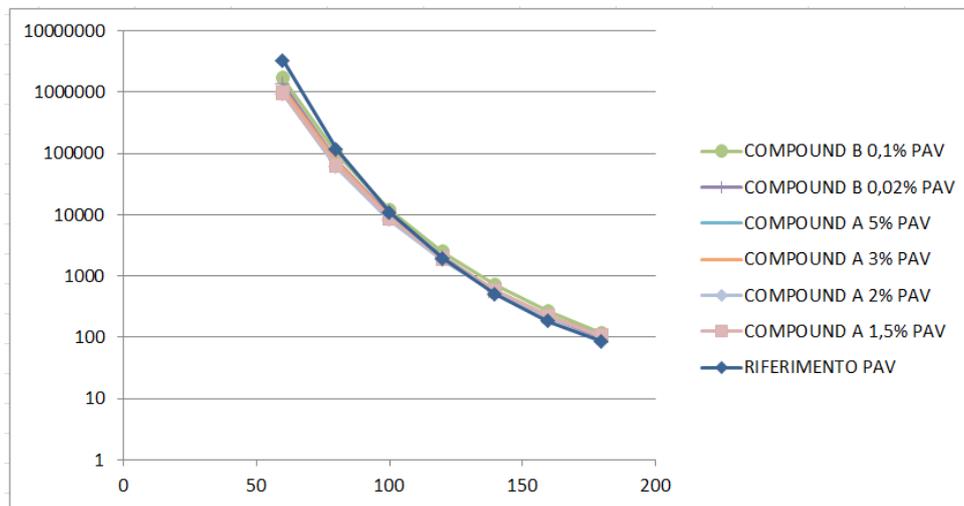
Nel [Grafico 39],[Grafico 40] sono rappresentate le caratteristiche di tutti i bitumi RTFOT. Si osserva che il bitume più viscoso è il COMPOUND B 0,1%.

3.5 GRAFICI DI RIEPILOGO PER TUTTI I BITUMI INVECCHIATI CON PAV

BITUMI PAV LOG-VISCOSITA'/TEMPERATURA



BITUMI PAV VISCOSITA'/TEMPERATURA



Nel [Grafico 41],[Grafico 42] sono rappresentate le caratteristiche di tutti i bitumi PAV. Si osserva che il bitume più viscoso a basse temperature è quello di riferimento, mentre ad alte temperature si ha la condizione opposta.

CAPITOLO 3.6 - OSSERVAZIONI

Analizzando i risultati delle prove è possibile osservare:

- L'invecchiamento aumenta la viscosità a parità di temperatura e velocità angolare. Questo accade perché l'invecchiamento ossida le particelle di bitume facendo perdere loro colore, resistenza e duttilità, rendendolo estremamente rigido, fragile e viscoso. Non a caso quando si ricicla conglomerato bituminoso spesso e volentieri è consigliato l'utilizzo di additivi ringiovanenti che permettono di ripristinare le caratteristiche originarie del bitume, riducendo il grado di ossidazione. Ovviamente maggiore è il tempo di invecchiamento subito dal bitume, maggiore sarà l'ossidazione e quindi la viscosità del bitume stesso. Analizzando la medesima tipologia di bitume notiamo infatti che il bitume invecchiato a lungo termine sarà quello con viscosità maggiore, mentre quello non invecchiato sarà il bitume meno viscoso, l'invecchiamento a breve termine invece darà come risultato una viscosità intermedia tra le due (ma più vicina al vergine). Eccone un esempio:

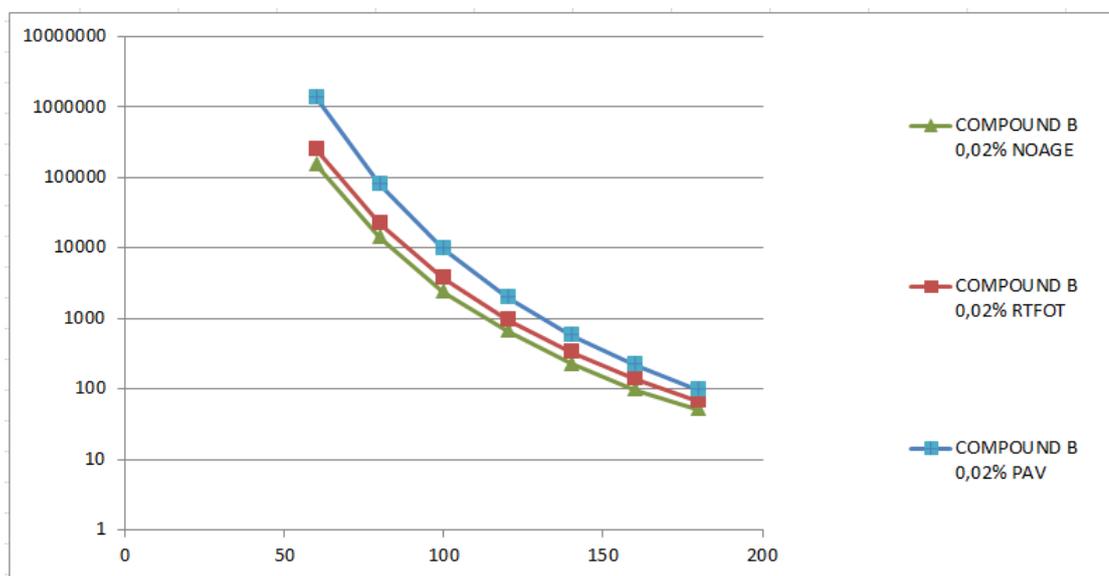


Grafico 43 "Viscosità-Temperatura per il bitume COMPOUND B 0,02% ai vari stati di invecchiamento"

- Si è registrato per certi campioni che la viscosità del bitume non invecchiato e quella del bitume invecchiato a breve termine è pressoché simile. Questo è dovuto al fatto che l'invecchiamento con l'RTFOT influenza in maniera trascurabile la viscosità.

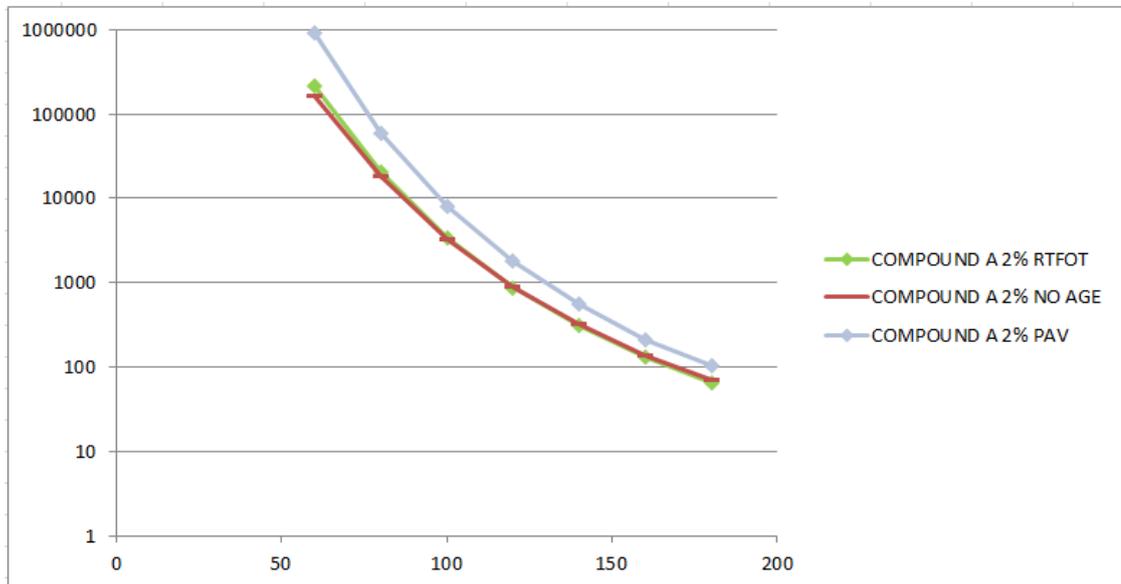


Grafico 44 "Viscosità-Temperatura per il bitume COMPOUND A 2% ai vari stati di invecchiamento"

- Il grafene incrementa significativamente la viscosità del bitume rispetto a quanto lo faccia il carbon black. Per spiegarsi meglio, il dosaggio dello 0,02% di grafene permette di raggiungere una viscosità pressoché simile a quella che si sarebbe ottenuta se si fosse utilizzato il 5% di carbon black.

temperatur T [°C]	COMPOUND A 5% NO AGE CORRETTA			temperatur T [°C]	COMPOUND B 0,02% NO AGE		
	Viscosità η $\log\eta$ [mPa*s]		Shear Rate SR [s ⁻¹]		Viscosità η $\log\eta$ [mPa*s]		Shear Rate SR [s ⁻¹]
60	148000	5,2	0,272	60	150000	5,2	0,272
80	16250	4,2	2,72	80	13675	4,1	3,4
100	3072	3,5	15,3	100	2355	3,4	17
120	830	2,9	51	120	643	2,8	68
140	296,9	2,5	74,4	140	223,8	2,3	97,7
160	130	2,1	186	160	96,5	2,0	186
180	75,7	1,9	186	180	50,3	1,7	186

Tabella 45 "Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% del COMPOUND A 5% NO AGE"

Tabella 46 "Parametri di viscosità associati ad uno sforzo prossimo al 50% del COMPOUND B 0,02% NO AGE"

- Non è stato invecchiato il Compound B 1% in quanto si sarebbero ottenute viscosità estremamente elevate e impossibili da studiare con il Viscosimetro a rotazione. Non a caso per lo studio di quest'ultimo, ad una temperatura di 60°C, è stato necessario cambiare girante con una più piccola, in quanto la minima velocità disponibile sul Rotoviscosimetro Brookfield sviluppava uno sforzo eccessivo e inadeguato per la prova. Con l'utilizzo di una girante più piccola lo sforzo tangenziale si è ridotto grazie alla minore superficie di contatto tra acciaio e bitume ed è stato possibile svolgere la prova.
- I dati raccolti hanno una relativa incertezza in quanto:
 - il bitume versato nel recipiente non sempre è stato della stessa identica quantità pur rispettando il grado di incertezza consentito.
 - la percentuale di agente modificante ricaduta nel recipiente cilindrico difficilmente è stata della quantità prescritta nella confezione.
 - parte del bitume e dell'agente modificante è stato parzialmente rimosso ogni qual volta si è dovuto cambiare girante [Figura 30]. La girante S21 infatti prevedeva una quantità di bitume pari a 9,7 g che è stata approssimativamente associata alla quantità di bitume iniziale meno quella rimossa al cambio di girante.



Figura 30 "Bitume perso con il cambio di girante"

- alcune letture sono state difficili da fare in quanto all'interno del recipiente cilindrico erano presenti granuli di agente modificante che rendevano le letture variabili e instabili.
- bisogna tenere conto anche del fatto che dallo svuotamento dei piatti del PAV è stato perso parte di bitume modificato che potrebbe aver alterato alcune percentuali di grafene e carbon black nel bitume, così come per il cambio di girante.
- Tutti i bitumi studiati, ad eccezione del COMPOUND B 1%, sviluppano delle viscosità accettabili. Infatti analizzando i range pubblicati dall'ANAS per la miscelazione del conglomerato bituminoso e per la posa in opera fatta "a regola d'arte", notiamo che le viscosità da noi ottenute soddisfano i criteri richiesti. Ecco i vari range:
 - Per il bitume di riferimento vergine (non invecchiato) bisogna avere, a $T=160^{\circ}\text{C}$, la viscosità η compresa tra 30 e 100 mPa·s.
 - Per il bitume modificato vergine bisogna avere, a $T=160^{\circ}\text{C}$, la viscosità η compresa tra 100 e 450 mPa·s.
 - Per bitumi invecchiati è possibile ricavare per quale temperatura si ha una viscosità η compresa tra 150 e 190 mPa·s e si valuta se quest'ultima è accettabile o meno.
- I bitumi vergini, al fine di raggiungere una viscosità accettabile, richiedono una temperatura di riscaldamento di circa 160°C .
- I bitumi invecchiati richiedono, invece, una temperatura che si aggira tra i 160 e 170°C .

CAPITOLO 4 - CONCLUSIONI

L'indagine sperimentale effettuata presso il laboratorio di Area Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, e dell'Architettura, sito in via Brezze Bianche, ha avuto come oggetto lo studio della viscosità di bitumi modificati e non, ottenuti aggiungendo al bitume di riferimento piccole percentuali di carbon black e grafene. Per ogni tipologia di bitume sono stati studiati 3 gradi di invecchiamento:

- 1) nessun invecchiamento, detto anche NO AGE o Vergine
- 2) invecchiamento a breve termine, RTFOT
- 3) invecchiamento a lungo termine, PAV

Le prove eseguite per la caratterizzazione dei bitumi modificati sono state prove di viscosità dinamica, effettuate con il Rotoviscosimetro Brookfield. I risultati ottenuti hanno portato alle seguenti conclusioni:

1. Qualunque sia il tipo di bitume, aumentando l'invecchiamento, aumenta la viscosità, in quanto si ha l'ossidazione di quest'ultimo con conseguente irrigidimento della struttura.
2. Qualunque sia il tipo di bitume, aumentando la temperatura, diminuisce la viscosità.
3. Ai diversi dosaggi di carbon black si sono ottenuti approssimativamente gli stessi valori di viscosità a parità di temperatura.
4. Aumentando la percentuale di grafene aumenta nettamente la viscosità del bitume.
5. Qualunque sia il tipo di bitume, aumentando il quantitativo di agente modificante, diminuisce la pendenza della retta log-viscosità/temperatura, ossia diminuisce il gradiente di decadimento della viscosità. In altre parole, tanto maggiore è il contenuto di agente modificante e tanto meno si riduce la viscosità del bitume a parità di temperatura.
6. A parità di percentuale e temperatura, l'agente modificante che rende più viscoso il bitume è il grafene.

7. Tutti i bitumi studiati sviluppano una viscosità accettabile alle temperature di miscelazione, ad eccezione del COMPOUND B 1% NO AGE, che risulta essere troppo viscoso

BIBLIOGRAFIA

- I – Rivista “Nature”- La più antica storia del bitume – www.siteb.it – 04 aprile 2018
- II – Il bitume – www.wikipedia.org – 19 giugno 2020
- III – Caratteristiche del bitume – www.casapratice.it -15 maggio 2018
- IV – La guida sul grafene: Che cos'è e tutto ciò che c'è da sapere - /newsroom – www.tecnogym.com – 30 luglio 2016
- V – Il grafene – www.wikipedia.org – 28 agosto 2021
- VI – Le strade al grafene – www.infobuild.it – Pietro Mezzi – 11 Novembre 2019
- VII – Che cos'è il Carbon Black e dove si può recuperare – www.violetta.net – Nicola Buratti – 21 Novembre 2003
- VII – Il Carbon Black – www.wikipedia.org
- IX – Carbon Black – ICBA (International Carbon Black Association)
- X - UNI EN 13302 (2010) – Determinazione della viscosità dinamica di un legante bituminoso utilizzando un viscosimetro rotante.
- XI - UNI EN 12607-1 (2015) - Determinazione della resistenza all'indurimento per effetto del calore e dell'aria – (Metodo RTFOT)
- XII - UNI EN 14769 (2013) – Invecchiamento, condizionamento accelerato a lungo termine mediante l'utilizzo di un recipiente di invecchiamento pressurizzato (Metodo PAV).
- α – La prima strada al grafene in Italia – La repubblica – 2 Aprile 2019