



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA  
(DICEA)

---

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

### **Analisi prestazionale di bitumi ad alto tenore di polimeri**

### **Performance Analysis of Highly Polymer Modified Bitumen**

*Relatore:*

Prof. Ing. **Fabrizio Cardone**

*Tesi di laurea di:*

**Desiree Magi**

*Correlatrice:*

Ing. **Simona Caimmi**

---

Anno accademico 2023/2024



## INDICE

1. Introduzione.....	3
1.1. Il bitume.....	3
1.2. Produzione del bitume.....	4
1.3. Composizione chimica del bitume.....	5
1.4. Produzione di bitumi modificati.....	5
1.5. Norma di classificazione dei bitumi modificati.....	6
2. Stato dell'arte.....	11
2.1. Miscele con bitumi ad alto contenuto di polimeri.....	11
3. Programma sperimentale.....	13
3.1. Materiali.....	13
3.2. Prove del programma sperimentale.....	14
3.3. Prova di penetrazione.....	14
3.4. Prova di Palla – Anello.....	15
3.5. Analisi della viscosità con Rotoviscosimetro (RV) Brookfield.....	17
3.6. Prove Binder Bond Strength (BBS).....	19
4. Analisi dei risultati.....	24
4.1. Risultati delle prove di penetrazione.....	24
4.2. Risultati delle prove di Palla – Anello.....	26
4.3. Risultati nell'analisi della viscosità.....	27
4.4. Risultati delle prove Binder Bond Strength (BBS).....	44
5. Conclusioni.....	94
Bibliografia.....	96
Sitografia.....	96
Normative.....	97

# 1.Introduzione

In questa tesi sono state analizzate le caratteristiche e le proprietà fondamentali di alcuni bitumi ad alto tenore di polimeri per comprenderne il comportamento e le relative prestazioni. L'esigenza di tale ricerca nasce dalla criticità dei bitumi tradizionali le cui proprietà risultano inadeguate alle nuove situazioni di traffico, in continuo aumento e caratterizzato da veicoli pesanti e lenti. L'aggiunta di polimeri permette inoltre di allungare la vita utile delle pavimentazioni e ciò consente di ridurre gli alti costi di monitoraggio e di manutenzione.

## 1.1. Il bitume

Secondo l'American Society for Testing and Materials (ASTM) si definisce bitume un generico materiale legante di colore da marrone scuro a nero, solido, semisolido o viscoso, di origine naturale o industriale, composto principalmente da idrocarburi ad alto peso molecolare, solubili in solfuro di carbonio [S1]. Nella norma UNI EN 12597 "Bitumen and bituminous binders, Terminology" [N1] invece è definito come un "materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell'asfalto nativo, completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente" [S2]. Il bitume naturale, "native asphalt", è presente sotto forma di laghi o depositi in Canada, a Trinidad, nel Venezuela, in Messico, a Cuba, nel Colorado, Palestina e in molti altri paesi. In Europa i giacimenti più importanti si trovano in Sicilia, specialmente a Ragusa, e in Abruzzo [S3]. Il bitume naturale solitamente è presente in una matrice minerale di natura argillosa, silicea o calcarea, formando le cosiddette rocce asfaltiche che contengono fino al 25% di bitume. Lo sviluppo dell'industria petrolifera ha messo a disposizione quantità sempre maggiori di bitume originate dalla raffinazione del petrolio, che oggi costituisce la fonte primaria di tale materiale. Le caratteristiche del bitume prodotto dal petrolio derivano sia dalla natura del grezzo di origine sia dal processo di produzione utilizzato. Il bitume prodotto dalla raffinazione del petrolio può essere soggetto a differenti processi post-raffinazione come l'ossidazione o la miscelazione con altre sostanze: polimeri, acqua, frazioni petrolifere, materiale minerale.

In particolare, in questo studio, sono stati analizzati i bitumi modificati, cioè, bitumi le cui caratteristiche reologiche e prestazionali vengono modificate attraverso l'additivazione di un elastomero o di un plastomero o di un altro agente chimico o fisico.

## **1.2. Produzione del bitume**

Il processo di produzione più comune è quello della distillazione frazionata mediante il quale si ottiene il frazionamento del greggio sfruttando le differenze esistenti fra le temperature di ebollizione dei suoi vari componenti. Il petrolio greggio viene introdotto in una caldaia e portato ad una temperatura di circa 650 K. La miscela ottenuta, sotto forma di vapore, alimenta una colonna di frazionamento. Nella colonna di frazionamento esiste un gradiente di temperatura: la parte superiore è più fredda di quella inferiore. Quando il vapore ascendente raggiunge un piatto contenente un liquido la cui temperatura è inferiore al punto di ebollizione di alcuni componenti del vapore stesso, esso parzialmente condensa. Quando una parte del vapore condensa in un liquido, il calore latente dissipato riscalda il liquido, e i componenti più volatili del liquido evaporano unendosi al vapore rimanente e incominciano a salire lungo la colonna. Il liquido, costituito dai componenti meno volatili, scorre attraverso i fori del piatto oppure cade per stramazzo e si ferma nel piatto sottostante. Questo processo avviene in modo continuo in ogni singolo piatto: i componenti meno volatili del vapore si condensano e quelli più volatili evaporano. Ciò porta alla raccolta in ogni piatto di una miscela di idrocarburi, in particolare nei piatti in cima alla colonna si raccolgono gli idrocarburi con punti di ebollizione più bassi mentre gli idrocarburi con punti di ebollizione maggiori si raccolgono vicino al fondo. La frazione più pesante del greggio, quella con le temperature di ebollizione più alte, viene poi trasferita in un'altra colonna e distillata sottovuoto; abbassando la pressione si riduce la temperatura di ebollizione dei vari costituenti e si garantisce che distillino a temperature inferiori alla loro temperatura di decomposizione. Con questo processo si ottengono oli lubrificanti e cere. Il residuo finale del processo è il bitume [S4].

## THE FRACTIONAL DISTILLATION OF CRUDE OIL

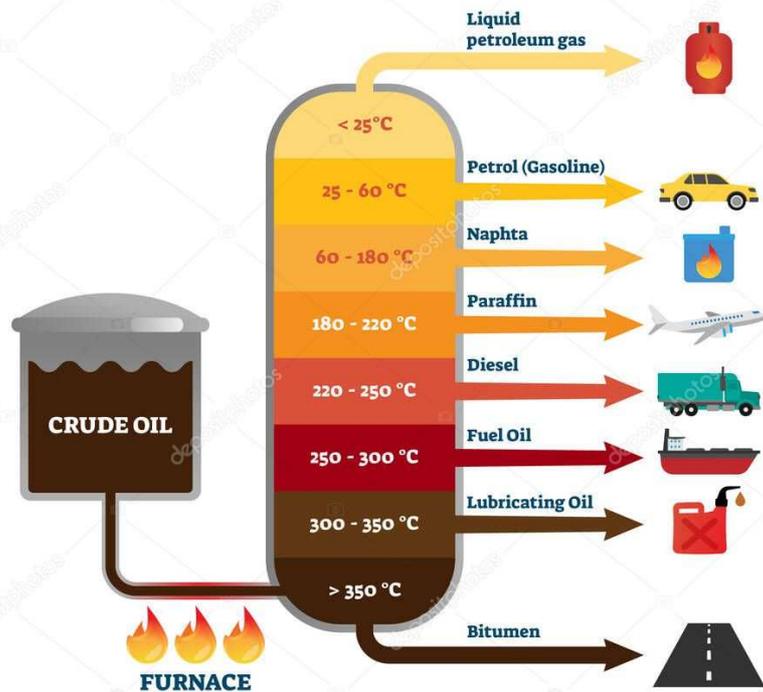


Figura 1.1 La distillazione frazionata del petrolio greggio

### 1.3. Composizione chimica del bitume

I bitumi sono composti da carbonio (79-88%), idrogeno (7-13%), ossigeno (2-8%), zolfo (inferiore all'8%), azoto (inferiore al 3%) e da tracce di vanadio, nichel e ferro [S5].

### 1.4. Produzione di bitumi modificati

Esistono impianti specifici per la produzione di bitumi modificati, in cui si effettua l'aggiunta di polimeri al bitume. Il bitume viene scaldato in cisterne di servizio a 170-180°C, poi viene pompato in cisterne di pesatura e miscelazione e si avviano i sistemi di dosaggio dei polimeri. L'insieme di bitume e polimeri viene pompato in un mulino omogeneizzatore. Il bitume modificato viene poi stoccato in cisterne apposite che permettono di realizzare l'agitazione del bitume modificato con polimeri, detto Polymer-modified-bitumen (PMB), per evitare l'agglomerazione del polimero. Per aumentare la stabilità della miscela,

il contenuto della cisterna deve essere mantenuto ad una temperatura di 160-180 °C [S6].

### **1.5. Norma di classificazione dei bitumi modificati**

Per i bitumi modificati si fa riferimento alla normativa UNI EN 14023 “Bitumi e leganti bituminosi, Quadro delle specifiche riguardanti i bitumi modificati da polimeri” [N2]. In tale norma vengono riportate le caratteristiche e i relativi metodi di prova per i bitumi modificati da polimeri, utilizzati nella costruzione e manutenzione di strade, di campi di aviazione e di altre aree pavimentate. In particolare, tale normativa tratta le seguenti tematiche:

- Consistenza alla temperatura di servizio intermedia;
- Consistenza alla temperatura di servizio elevata;
- Coesione;
- Durabilità della consistenza;
- Fragilità a bassa temperatura di servizio;
- Recupero della deformazione.

La coesione si utilizza come mezzo di discriminazione tra i bitumi modificati con polimeri e altri leganti bituminosi. Altri requisiti essenziali sono l’adesione e la capacità di presa. Nelle tabelle 1.1, 1.2 e 1.3 riportate di seguito vengono introdotte le classi di consistenza, le quali permettono di scegliere il bitume più adatto alle condizioni locali, al clima e all’utilizzo.

PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	Classes for all polymer modified bitumens									
			2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Penetration at 25 °C	EN 1426	0,1 mm	10-40	25-55	45-80	40-100	65-105	75-130	90-150	120-200	200-300	
Softening Point	EN 1427	°C	≥ 80	≥ 75	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 55	≥ 50	≥ 45	≥ 40	
Cohesion <sup>a</sup>	Force ductility <sup>a</sup> (50 mm/min traction) or	EN 13589 followed by EN 13703	J/cm <sup>2</sup> ≥ 3 at 5 °C	≥ 2 at 5 °C	≥ 1 at 5 °C	≥ 2 at 0 °C	≥ 2 at 10 °C	≥ 3 at 10 °C	≥ 0,5 at 15 °C	≥ 2 at 15 °C	≥ 0,5 at 20 °C	≥ 0,5 at 25 °C
	Tensile test <sup>a</sup> (100 mm/min traction) or	EN 13587 followed by EN 13703	J/cm <sup>2</sup> ≥ 3 at 5 °C	≥ 2 at 5 °C	≥ 1 at 5 °C	≥ 3 at 0 °C	≥ 3 at 10 °C					
	Vialit pendulum <sup>a</sup> (Impact test)	EN 13588	J/cm <sup>2</sup> ≥ 0,7									
Resistance to hardening <sup>b</sup>	Retained Penetration	EN 12607-1	%	≥ 35	≥ 40	≥ 45	≥ 50	≥ 55	≥ 60			
	Increase in Softening point		°C	≤ 8	≤ 10	≤ 12						
	Change of mass <sup>c</sup>		%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 1,0					
Flash Point	EN ISO 2592	°C	≥ 250	≥ 235	≥ 220							

<sup>a</sup> One cohesion method shall be chosen based on end application. Vialit cohesion (EN 13588) shall only be used for surface dressing binders.

<sup>b</sup> The main test is the RTFOT at 163 °C. For some highly viscous polymer modified bitumens where the viscosity is too high to provide a moving film it is not possible to carry out the RTFOT at the reference temperature of 163 °C. In such cases the procedure shall be carried out at 180 °C in accordance with EN 12607-1.

<sup>c</sup> Change of mass can be positive or negative.

Tabella 1.1 Quadro delle specifiche riguardanti i bitumi modificati da polimeri- proprietà applicabili a tutti i bitumi modificati da polimeri.

Le proprietà nella Tabella 1.1 devono essere specificate per tutti i bitumi modificati da polimeri elencati in questa tabella. Sono associate a requisiti normativi o HSE e devono essere incluse in tutte le specifiche.

PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	Classes for regional requirements										
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fraass Breaking Point	EN 12593	°C	NR <sup>a</sup>	TBR <sup>b</sup>	≤ 0	≤ - 5	≤ - 7	≤ - 10	≤ - 12	≤ - 15	≤ - 18	≤ - 20	≤ - 22
Elastic recovery	25 °C or <sup>c</sup>	EN 13398	%	NR <sup>a</sup>	TBR <sup>b</sup>	≥ 80	≥ 70	≥ 60	≥ 50				
	10 °C	EN 13398	%	NR <sup>a</sup>	TBR <sup>b</sup>	≥ 75	≥ 50						

<sup>a</sup> NR. No Requirement may be used when there are no regulations or other regional requirements for the property in the territory of intended use.

<sup>b</sup> TBR. To Be Reported may be used when there are no regulations or other regional requirements for the property in the territory of intended use, but the property has been found useful to describe polymer modified bitumens.

<sup>c</sup> Where required, polymer modified bitumens shall conform to the requirements for elastic recovery at 25 °C or 10 °C.

Tabella 1.2 Quadro delle specifiche riguardanti i bitumi modificati da polimeri – proprietà associate a requisiti normativi o ad altri requisiti regionali.

Le proprietà nella Tabella 1.2 devono soddisfare specifiche condizioni regionali. Sono associate a requisiti normativi o ad altri requisiti regionali.

PROPERTY	TEST METHOD	UNIT	Classes for the additional properties of polymer modified bitumens								
			0	1	2	3	4	5	6	7	
Plasticity range	5.2.8.4	°C	NR <sup>a</sup>	TBR	≥ 85	≥ 80	≥ 75	≥ 70	≥ 65	≥ 60	
Drop in softening point after EN 12607-1	EN 1427	°C	NR <sup>a</sup>	TBR	≤ 2	≤ 5					
Elastic recovery at 25 °C after EN 12607-1	EN 13398	%	NR <sup>a</sup>	TBR	≥ 70	≥ 60					≥ 50
Elastic recovery at 10 °C after EN 12607-1	EN 13398	%	NR <sup>a</sup>	TBR	≥ 50						
Storage stability <sup>b</sup>	EN 13399										
Difference in softening point	EN 1427	°C	NR <sup>a</sup>	TBR <sup>b</sup>	≤ 5						
Storage stability <sup>b</sup>	EN 13399										
Difference in penetration	EN 1426	0,1 mm	NR <sup>a</sup>	TBR <sup>b</sup>	≤ 9	≤ 13	≤ 19	≤ 26			

<sup>a</sup> NR. No Requirement may be used when there are no requirements for the property in the territory of intended use.

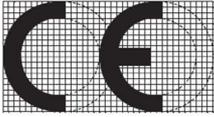
<sup>b</sup> Storage conditions of the polymer modified binder shall be given by the supplier. Homogeneity is necessary for polymer modified bitumens. The tendency of polymer modified bitumens to separate during storage may be assessed by the storage stability test (see EN 13399). If the product does not fulfil the properties in Table 3 Classes 2 to 5, information shall be given by the supplier regarding storage conditions for the polymer modified bitumen to avoid separation of the components and to ensure the homogeneity of the product.

Tabella 1.3 Quadro delle specifiche riguardanti i bitumi modificati da polimeri – proprietà aggiuntive.

Le proprietà nella Tabella 1.3 sono proprietà aggiuntive, che non sono obbligatorie, ma sono state ritenute utili in alcuni paesi per descrivere i bitumi modificati da polimeri.

La nomenclatura dei bitumi modificati con polimeri comprende l'intervallo di penetrazione e il punto di minimo rammollimento.

Il produttore o un rappresentante autorizzato deve apporre al bitume la marcatura CE in cui si riporta il numero identificativo dell'organismo di identificazione, il nome o marchio identificativo e sede legale del produttore, le ultime due cifre dell'anno in cui è apposto il contrassegno, il numero del Certificato di conformità CE o del certificato di controllo della produzione di fabbrica, il riferimento alla presente norma europea (EN 14023) [N2], la descrizione del prodotto: nome generico, grado e destinazione d'uso, le informazioni sulle caratteristiche essenziali che devono essere riportate come valori dichiarati e, dove rilevante, come livello o classe. L'opzione "Nessuna prestazione determinata" (NPD) può essere utilizzata quando la caratteristica non è soggetta a requisiti normativi nello Stato membro di destinazione.

 <b>01234</b>
<b>AnyCo Ltd</b> , P.O. Box 21, B - 1050  <b>10</b> 01234-CPD-00234
<b>EN 14023</b> <i>Polymer modified bitumen 45/80-60</i>

*CE conformity marking, consisting of the "CE"-symbol given in Directive 93/68/EEC.*

*Identification number of the notified body*

*Name or identifying mark and registered address of the producer*

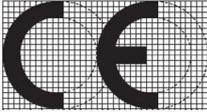
*Last two digits of the year in which the CE marking was affixed*

*Certificate number*

*Reference to the European Standard*

*Description of product and information on regulated characteristics*

Figura 1.2 Esempio di marcatura CE abbreviata per bolla di consegna

  <b>01234</b>
<b>AnyCo Ltd</b> , P.O. Box 21, B - 1050  <b>10</b>  01234-CPD-00234
<b>EN 14023</b>  <i>Polymer modified bitumen 45/80-60</i>  Penetration at 25 °C.....Class 4 Softening point.....Class 6 Force ductility..... Class 3  Resistance to hardening (EN 12607-1) . Retained penetration at 25 °C.....Class 5 . Increase in softening point.....Class 2

*CE conformity marking, consisting of the "CE"-symbol given in Directive 93/68/EEC.*

*Identification number of the notified body*

*Name or identifying mark and registered address of the producer*

*Last two digits of the year in which the CE marking was affixed*

*Certificate number*

*Reference to the European Standard*

*Description of product and information on regulated characteristics*

Figura 1.3 Esempio di informazioni sulla marcatura CE

## 2. Stato dell'arte

I bitumi modificati vengono utilizzati soprattutto in ambito autostradale e aeroportuale in quanto sono dotati di numerosi vantaggi: possiedono maggiore resistenza alle basse temperature, risulta migliorata la resistenza all'invecchiamento e alla fatica, hanno minore suscettibilità alle variazioni termiche e maggiori capacità elastiche. L'esigenza di migliorare le proprietà dei bitumi deriva dal deterioramento e consumo eccessivo delle attuali pavimentazioni stradali collegato al continuo aumento del traffico veicolare. [1] Un ulteriore aspetto positivo dell'introduzione dei polimeri nel bitume risiede nell'aumento della porosità: si ottengono i cosiddetti bitumi aperti, i quali hanno un grado di porosità pari al 15%. Ciò permette di ridurre la creazione di strati sottili di acqua e quindi di evitare il fenomeno dell'aquaplaning ("slittamento sull'acqua").

Con l'aggiunta di polimeri il bitume migliora anche le sue capacità idrorepellenti e quindi, con una maggiore impermeabilizzazione, si riducono i dissesti causati dalla penetrazione dell'acqua sotto il manto stradale.

Si può notare, inoltre, che l'aggiunta di polimeri consente di prolungare la vita utile delle pavimentazioni: con i bitumi tradizionali si ha una durata di circa 4 anni mentre con i bitumi modificati con polimeri (PMB) si arriva fino a 8 anni.

A livello economico la produzione di bitumi modificati con polimeri necessita di costi maggiori, ma considerando una maggiore durata e un miglioramento delle prestazioni si può osservare un risparmio nel tempo sulle spese di manutenzione e monitoraggio. [S7]

### 2.1. Miscele con bitumi ad alto contenuto di polimeri

Le miscele bituminose altamente modificate (HiMA) contengono un legante asfaltico che viene generalmente modificato con il 7-8% di polimeri, soprattutto si utilizza stirene-butadiene-stirene (SBS). Questa quantità di polimero è più del doppio di ciò che viene comunemente utilizzato nei leganti convenzionali modificati con polimero: circa il 3% in peso del legante. Secondo una ricerca del Dipartimento dei trasporti della Florida (FDOT) la struttura legante-polimero dei leganti modificati convenzionali è costituita da un legante asfaltico con una fase polimerica rigonfiata dispersa che migliora le proprietà del legante. Aumentando il contenuto di polimeri, i ricercatori hanno scoperto che la

struttura si trasforma in un polimero rigonfio con fase asfaltica dispersa. Questo rende il comportamento del legante risultante più come una gomma e migliora la resistenza alla fessurazione e all'ormaiamento. [2]

Le miscele contenenti bitume ad alto contenuto di polimeri, oltre agli aspetti positivi dei bitumi modificati, possono offrire ulteriori vantaggi in termini di flessibilità delle pavimentazioni soggette a carichi veicolari pesanti. Inoltre, si può ridurre fino al 40% lo spessore dello strato di asfalto con conseguente riduzione dei costi iniziali. Produrre leganti per miscele bituminose modificate è più difficile in quanto richiedono temperature più elevate, però, grazie alle loro prestazioni migliorate, si verificano meno solchi sulla pavimentazione alle alte temperature, minori fessurazioni a temperature intermedie e minor cracking termico alle basse temperature dovuto al loro comportamento più duttile. [3]

Uno studio condotto alla "ORLEN Asphalt" in Polonia ha mostrato inoltre che la rete polimerica che si viene a creare nel legante blocca la propagazione delle crepe.

Il modificatore SBS viene utilizzato per la sua elasticità e per la possibilità di essere riciclato. Inoltre, il polimero SBS assorbe parte delle frazioni più leggere (maltene) del bitume, si espande e forma una rete elastomerica nel bitume che fornisce una risposta elastica al carico ad alte temperature di servizio dove i leganti asfaltici non modificati si comportano come un fluido viscoso, migliora la forza di adesione e di trazione, riduce la sensibilità alla temperatura. La forza della rete dipende dal contenuto di polimeri. [4]

I leganti per miscele modificate con polimeri SBS hanno mostrato migliori prestazioni a tutte le temperature rispetto ai leganti non modificati e a quelli modificati con polimeri chimicamente reattivi.

Uno dei bitumi oggetto di studio in questo lavoro di tesi è prodotto da un'azienda polacca il cui scopo nel creare bitumi modificati con polimeri è quello di ampliare l'intervallo di temperatura in cui il bitume mostra proprietà viscoelastiche (plasticity range). Per la produzione si sono utilizzati bitumi speciali compatibili con i polimeri aggiunti. Il modificatore addizionato è stato l'SBS per questo tale tipologia di bitume viene chiamata anche bitume modificato con elastomeri. [5]

### 3. Programma sperimentale

L'obiettivo di tale studio è quello di caratterizzare bitumi ad alto tenore di polimeri, ovvero determinare alcune proprietà fondamentali per comprenderne il comportamento e le relative prestazioni.

Il programma sperimentale portato avanti si è basato sull'esecuzione di quattro prove: prova di penetrazione, prova di rammollimento (palla-anello), prova di viscosità dinamica e prova BBS (Binder Bond Strength).

#### 3.1. Materiali

I bitumi scelti per effettuare le prove si differenziano per le diverse percentuali di polimeri che contengono. Tutti e quattro i bitumi utilizzati contengono polimeri SBS ovvero stirene-butadiene-stirene. In particolare, è stato utilizzato:

- "PMB": bitume modificato HARD con il 3,8% di polimeri SBS;
- "HPMB\_V": bitume super-modificato con il 9% di polimeri SBS;
- "HPMB\_O": bitume super-modificato con il 7,5% di polimeri SBS prodotto in Polonia;
- "HPMB\_A": bitume super-modificato con il 7,5% di polimeri SBS prodotto in Italia.

Le caratteristiche di tali leganti fornite dai produttori sono:

Proprietà	Normativa	Unità	HPMB_O	HPMB_V	HPMB_A
Penetration 25°C	EN 1426	0.1 mm	45 - 80	45 - 80	52
Softening Point	EN 1427	°C	≥ 80	90	75,9
Force ductility tested using ductilometer	EN 13589 EN 13703	J/cm2	≥ 1 at 10°C	3,0	-
Resistance to hardening   Change of mass	EN 12607-1	%	<0.5	0,5	-
Resistance to hardening   Retained penetration at 25°C	EN 12607-1	%	≥ 60	60	-
Resistance to hardening   Softening point increase	EN 12607-1	°C	< 8	5	-
Flash point	EN ISO 2592	°C	≥ 235	250	-
Fraass breaking point	EN 12593	°C	≤ -18	-	-
Elastic recovery at 25°C	EN 13398	%	≥80	85	

Proprietà	Normativa	Unità	HPMB_O	HPMB_V	HPMB_A
Plasticity range	EN 14023 Item 5.2.8.4	°C	NR		
Drop in softening point after EN 12607-1	EN 1427	°C	TBR		
Elastic recovery at 25°C after EN 12607-1	EN 13398	%	≥ 50		-
Storage stability - difference in softening point	EN 13399 EN 1427	°C	≤ 5	5	-
Storage stability - difference in penetration	EN 13399 EN 14276	0.1 mm	NR	-	-

Tabella 3.1 Caratteristiche dei leganti.

Per quanto riguarda il bitume “HPMB\_A” non si hanno a disposizione la maggior parte dei valori in quanto, a differenza degli altri leganti che sono attualmente in commercio, tale lagante è ancora in fase sperimentale.

### 3.2. Prove del programma sperimentale

Le prove del programma sperimentale effettuate sono:

- prova di penetrazione
- prova di rammollimento (palla-anello)
- prova di viscosità dinamica
- prova BBS (Binder Bond Strength)

### 3.3. Prova di penetrazione

Tale prova consente di determinare la consistenza del bitume e dei leganti bituminosi; i bitumi più duri e consistenti avranno valori di penetrazione più bassi mentre i bitumi più morbidi e meno consistenti avranno valori più alti. Dato che il bitume risulta essere un materiale termo-dipendente la sua consistenza varia a seconda della temperatura, per questo la prova viene eseguita condizionando allo stesso modo tutti i campioni di bitume. La norma a cui si fa riferimento per lo svolgimento della prova è la norma UNI EN 1426 “Bitumi e leganti bituminosi, determinazione della penetrazione con ago” (agosto 2015) [N3]. La norma stabilisce il peso del carico totale a cui viene sottoposto il campione di bitume pari a 100g, la temperatura di prova pari a 25°C e la durata della prova pari a 5 secondi. Per la prova sono stati utilizzati i quattro bitumi oggetto di studio: PMB, HPMB\_V, HPMB\_O e HPMB\_A.

Per prima cosa sono stati scaldati i quattro bitumi a 160°C affinché diventassero liquidi, raggiunta tale condizione è stato versato il bitume per un'altezza di 2 cm in dei contenitori cilindrici in acciaio di altezza 35mm e diametro 50mm. Sono stati realizzati 8 provini, 2 per ogni bitume. Tali provini sono stati condizionati per 90 minuti a temperatura ambiente e per altri 90 minuti in un bagno termostatico a 25°C. Al termine del condizionamento si è potuta effettuare la prova vera e propria. Per prima cosa è stato verificato che lo strumento fosse in bolla, si è poi acceso il temporizzatore controllando che il tempo impostato fosse di 5 secondi ovvero il lasso di tempo stabilito dalla norma durante il quale l'ago penetra nel bitume. Dopo aver posizionato il provino sulla base del penetrometro si è inserito l'ago nell'asta porta ago, quest'ultima posta a contatto con l'asta misuratrice. È stato poi avvicinato l'ago tramite manovelle in modo che esso sfiorasse la superficie di bitume; prima di avviare la prova si è azzerato il valore sul display. Per far partire la prova è stato premuto il tasto sul temporizzatore e al termine è stata abbassata l'asta misuratrice per porla nuovamente a contatto con l'asta porta ago. A questo punto si è potuto leggere il valore di penetrazione sul display espresso in mm. Sono state effettuate 3 prove sullo stesso campione, a distanza di 1 cm dal bordo e di 1 cm l'una dall'altra.



Figura 3.1 Penetrometro e provini

### 3.4. Prova di Palla – Anello

Tale prova consente di determinare il punto di rammollimento del bitume e dei leganti bituminosi nell'intervallo tra 30°C e 150°C, ciò permette di determinare le prestazioni del bitume alle alte temperature; maggiore sarà la temperatura di rammollimento, migliori saranno le prestazioni del bitume alle alte

temperature. La norma a cui si fa riferimento per lo svolgimento della prova è la norma UNI EN 1427 “Bitumi e leganti bituminosi, determinazione del punto di rammollimento, metodo biglia e anello” (agosto 2015) [N4]. Per la prova si sono utilizzati i quattro bitumi oggetto di studio: PMB, HPMB\_V, HPMB\_O e HPMB\_A.

Ogni singolo bitume è stato scaldato a 160°C in forno affinché la consistenza diventasse liquida; successivamente il bitume è stato versato in due anelli in ottone in quantità tale da evitare il fenomeno di ritiro che tende a verificarsi in seguito a raffreddamento. È stato poi lasciato raffreddare per 1 ora affinché si solidificasse nuovamente. A questo punto la superficie è stata lisciata con una spatolina calda; al termine di tale operazione gli anelli sono stati posizionati in un apposito supporto metallico. Sopra di essi sono stati posizionati i reggi-sfera, anelli più grandi con un foro centrale che servono per posizionare perfettamente al centro del campione le sfere in acciaio di 3,5 grammi ciascuna. Per lo svolgimento della prova è necessario l'utilizzo di un becher riempito d'acqua che va condizionato a 5°C così come la struttura con gli anelli di bitume e le sferette da collocare successivamente sui reggi-sfera. Effettuato il condizionamento è stato possibile inserire all'interno del becher la struttura contenente i provini e sul fondo è stato collocato un magnete. Si è proceduto poi posizionando il becher sul fornello elettrico dello strumento atto ad effettuare la prova, è stata inserita la sonda termometrica e le sfere metalliche negli appositi spazi e si è scelto il range di temperatura della prova. In tutte le ripetizioni è stato selezionato inizialmente il range più basso (30°C-80°C) e quando questo è risultato insufficiente per espletare la prova si è scelto successivamente l'intervallo 80°C-150°C. Dopo aver avviato la prova si è assistito ad un graduale aumento di temperatura, pari a 5°C al minuto, e il bitume ha iniziato a deformarsi sotto il peso delle sferette. Rammollendosi il bitume è sceso fino a toccare la piastra inferiore del supporto in acciaio. La prova è terminata quando entrambi i campioni di bitume hanno raggiunto la suddetta piastra posizionata ad una distanza di 1 pollice (25,4 mm) rispetto alla lastra su cui sono sistemati gli anelli. Grazie ad un sistema ad infrarossi è stato possibile leggere sul display la temperatura alla quale i due campioni di bitume hanno toccato la piastra metallica che corrisponde alla temperatura di rammollimento.



Figura 3.2 Preparazione campioni



Figura 3.3 Esecuzione prova

### 3.5. Analisi della viscosità con Rotoviscosimetro (RV) Brookfield

Tale prova permette di determinare la viscosità dinamica di una varietà di leganti bituminosi: leganti bituminosi modificati e no, emulsioni bituminose, aggregati e leganti bituminosi flussati per mezzo di un viscosimetro rotante a cilindri coassiali. Ciò consente di ottenere la viscosità del bitume a temperature prossime a quelle di miscelazione e compattazione. Per la prova si sono utilizzati i quattro bitumi oggetto di studio: PMB, HPMB\_V, HPMB\_O e HPMB\_A. La norma a cui si fa riferimento per lo svolgimento della prova è la norma UNI EN 13302 “Bitumi e leganti bituminosi, determinazione della viscosità dinamica di un legante bituminoso utilizzando un viscosimetro rotante” (aprile 2010) [N5].

La viscosità è una grandezza che consente di determinare la resistenza di un fluido allo scorrimento, in particolare si sottopone il fluido ad uno sforzo tangenziale. Si ha la relazione:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

da cui la viscosità  $\eta$  (Pa\*s) è uguale al rapporto tra la tensione tangenziale  $\tau$  (Pa) e la velocità di scorrimento  $\dot{\gamma}$  (1/s).

Lo strumento utilizzato per questa prova è il viscosimetro Brookfield; esso è dotato di un fornello alla base che serve per scaldare il cilindro contenente il campione di bitume. In alto si appende la spindle (la girante) anch'essa di forma cilindrica che entra all'interno del campione di bitume creando la configurazione dei due cilindri coassiali. Sul display del viscosimetro si può leggere il valore di viscosità, la temperatura di prova, il valore di torcente, la velocità di rotazione della spindle, lo shear stress (SS) cioè lo sforzo tangenziale e lo shear rate (SR) ovvero la velocità di scorrimento. Lo shear stress è lo sforzo che il motore deve compiere per mantenere in movimento la spindle mentre lo shear rate è associato a una specifica percentuale di lavoro che deve svolgere il viscosimetro.

Per effettuare la prova è stato scaldato il bitume in forno fino a raggiungere la consistenza liquida, a questo punto si sono realizzati diversi campioni di bitume andandone a versare 10g all'interno di provini di forma cilindrica. Successivamente tali campioni, dopo essersi raffreddati, sono stati sottoposti alla prova. Per ogni provino è stata misurata la viscosità alla temperatura di 115°C, 135°C, 160°C e 180°C e per ogni temperatura si è scelta una velocità che permettesse di avere un torcente del 15%, 30%, 50%, 70% e 90%. Dopo aver impostato la prima temperatura si è posizionato il cilindro contenente bitume nel fornello elettrico e si è aspettato un'ora per permettere al bitume solido di scaldarsi e sciogliersi; nel frattempo anche la spindle, appesa allo strumento, è stata abbassata tramite manovelle laterali e inserita nel fornello per condizionarsi. Ottenuto bitume allo stato liquido nel cilindro, si è abbassata ulteriormente la spindle all'interno del campione in modo tale da essere completamente ricoperta di bitume. Dopo aver registrato i valori di viscosità e shear stress per ognuno dei cinque torcenti di riferimento si è proseguito con le temperature successive, aspettando 15 minuti tra una temperatura e l'altra. Per le temperature di 115°C e 135°C si è utilizzata la spindle S21 mentre per

le temperature di 160°C e 180°C si è utilizzata la spindle S27 questo poiché alle temperature più alte risultava un torcente superiore al 100% anche alla velocità più bassa.



Figura 3.8 Cilindri



Figura 3.9 Spindle S21



Figura 3.10 Spindle S27



Figura 3.11 Rotoviscosimetro

### 3.6. Prove Binder Bond Strength (BBS)

Tale prova consente di determinare la forza di trazione necessaria per staccare (pull-off) un pistoncino incollato con 0,08g di bitume su un substrato solido di aggregato. La norma a cui si fa riferimento per lo svolgimento della prova è la

AASHTO T 361-16 “Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test” [N6]. Tale prova permette di valutare le proprietà adesive/coesive dei sistemi bitume-aggregato. Lo strumento che si utilizza si chiama PATTI (Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument), è costituito da un’unità di controllo digitale alimentata mediante aria compressa (massimo 200 psi) a cui si collega un tubo che termina con il corpo del pistone con annesso lo stantuffo che andrà posizionato attorno al pistoncino incollato con il bitume. Quando si applica aria compressa attraverso il tubo la guarnizione tende a salire verso l’alto ma questo movimento risulta impedito dal piatto di reazione posto in sommità e avvitato al pistoncino (pull stub). Quindi, entrando in pressione, il piatto di reazione tira il pull stub verso l’alto finché, incrementando progressivamente la pressione applicata, si raggiunge la rottura del sistema ovvero il distacco del pistoncino dall’aggregato. Sul display dello strumento si può leggere il valore in tempo reale della pressione in psi e il valore massimo e minimo di pressione raggiunti durante la prova. Dal valore massimo si può ottenere il valore del POTS (Pull-off Tensile Strength) tramite la relazione riportata dalla norma:

$$POTS = \frac{(B_p \cdot A_g) - C}{A_{PS}}$$

Dove:

- POTS (Pull-Off Tensile Strength)= forza di trazione del tiraggio (psi)
- $B_p$  (Burst Pressure)= pressione di rottura (psi)
- $A_g$ = area di contatto tra guarnizione e piatto di reazione= 1,914 pollici<sup>2</sup> per pistone F-2
- C= costante del pistone= 0,180+/-1,5% per pistone F-2
- $A_{PS}$ = area del pistoncino= 0,1963 pollici<sup>2</sup>

Successivamente si trasforma il valore del POTS da psi a kPa moltiplicando per il fattore di conversione:  $POTS [kPa] = POTS [psi] \cdot 6,8947573$

Per completare la prova si svolge anche un’analisi visiva della superficie di rottura per stabilire se quest’ultima è di tipo coesivo, adesivo o intermedio tra le due. Si definisce rottura coesiva quella in cui la superficie di rottura si trova all’interno dello strato di bitume compreso tra la superficie dell’aggregato e la superficie del pistoncino senza che si verificano distacchi da entrambe le

interfacce. La rottura adesiva è quella in cui la superficie di rottura si posiziona in corrispondenza di quella dell'aggregato con conseguente distacco dal supporto. La rottura coesiva/adesiva o ibrida è intermedia tra le due. Si può verificare anche una rottura indesiderata se il bitume si stacca dal pistoncino e in tal caso la prova va ripetuta.

I materiali utilizzati in questa prova sono stati i quattro bitumi oggetto di studio (PMB, HPMB\_V, HPMB\_O, HPMB\_A) e i seguenti aggregati: calcare vergine e calcare riciclato, basalto vergine e basalto riciclato. Con aggregato riciclato si intende un aggregato vergine ricoperto da uno strato sottile di bitume invecchiato.

L'aggregato riciclato è stato ottenuto applicando 0,8 g di bitume SBS AMPLIA per ottenere uno spessore di 10 $\mu$ m su un aggregato vergine e successivamente fatto invecchiare in forno per cinque giorni a 85°C.

Per effettuare la prova la prima operazione eseguita è stata quella di porre a scaldare gli aggregati in forno per due ore a 160°C per gli aggregati vergini e a 60°C per gli aggregati riciclati. Nel frattempo, si sono realizzate delle "palline" di bitume di peso di 0,08g partendo da dei filamenti dello stesso, precedentemente ottenuti. Tali palline sono state posizionate sui pistoncini rivolti verso l'alto e al momento opportuno questi ultimi sono stati messi in forno per far sciogliere il bitume e poterli quindi incollare sul substrato. In particolare, per quanto riguarda il bitume PMB e il bitume HPMB\_A essi sono stati scaldati a 160°C, il bitume HPMB\_O a 170°C e il bitume HPMB\_V a 180°C. Tali temperature di incollaggio dei bitumi sono state ottenute prendendo come riferimento la viscosità del bitume HPMB\_O a 170°C (447 mPa\*s) e ricavando dal grafico  $\log\eta$ -T le temperature degli altri bitumi a viscosità prossime a quella di riferimento. Si è ottenuta la temperatura 160°C per i bitumi PMB e HPMB\_A (viscosità corrispondente a 456 mPa\*s e 423 mPa\*s) e la temperatura 180°C per il bitume HPMB\_V (viscosità corrispondente a 418 mPa\*s).

In seguito, è stato riportato un esempio dell'utilizzo del grafico in questione:

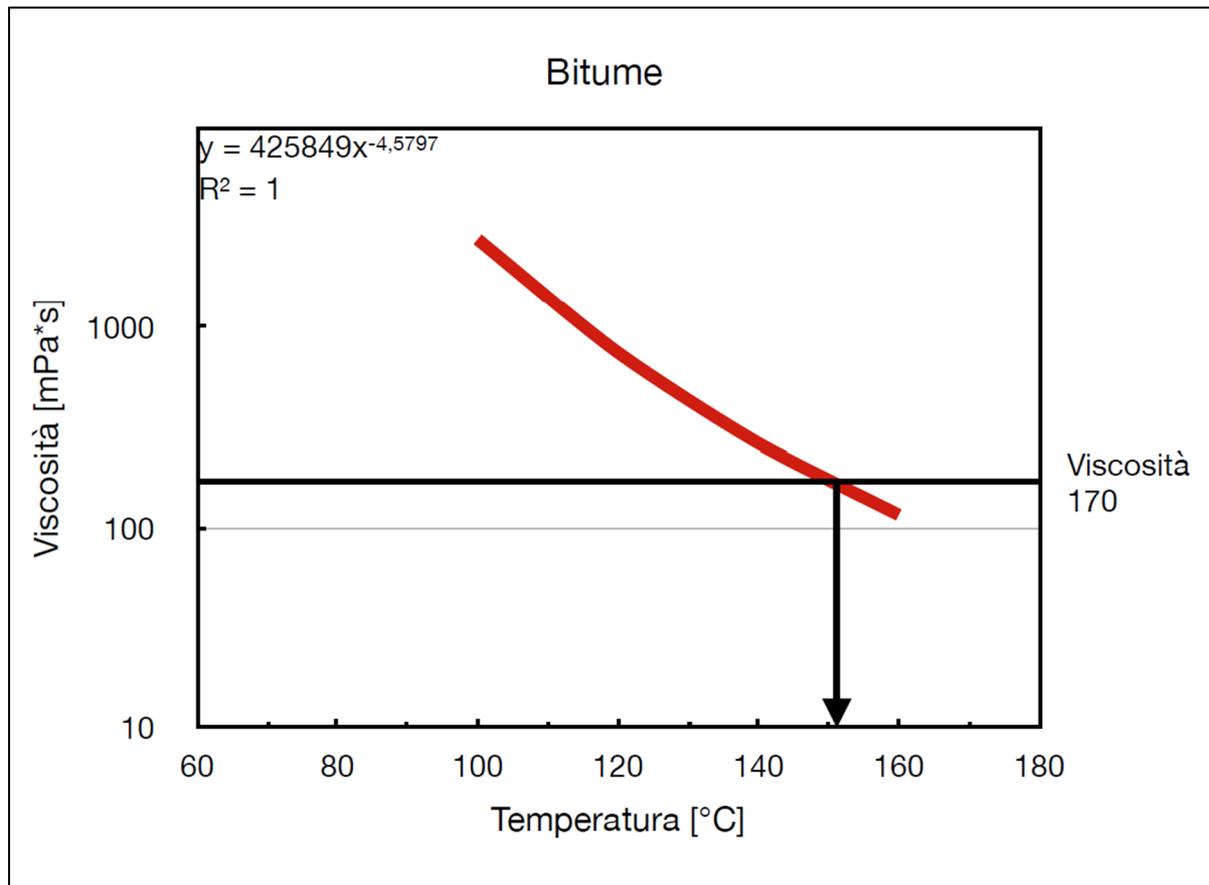


Fig. 3.12 Grafico  $\log\eta$ -T

Per incollare i pistoncini sul substrato si è prima estratto dal forno l'aggregato e poi si è prelevato un pistoncino alla volta utilizzando delle pinzette; ci si è quindi avvicinati all'aggregato mantenendo il pistoncino in posizione verticale. Quando ci si è trovati in prossimità del substrato il pistoncino è stato girato velocemente per non far colare il bitume liquido e lo si è appoggiato sull'aggregato; si è quindi tenuto premuto il pistoncino per qualche secondo per evitare che si potesse spostare. Si è proceduto analogamente per l'incollaggio degli altri pistoncini; in particolare sono stati utilizzati 5 pistoncini per l'aggregato calcareo e 5 per l'aggregato basaltico sia in condizioni "dry" che in condizioni "wet" e sia nel caso di aggregati vergini che di aggregati riciclati. I provini così ottenuti sono stati lasciati raffreddare per un'ora a temperatura ambiente, poi quelli da testare in condizioni "dry" sono stati posti

in camera climatica a 25°C per 24 ore mentre i “wet” sono stati posizionati nel bagno termostatico a 40°C per 24 ore e poi in camera climatica a 25°C per un’ora. Trascorso il tempo di condizionamento è stato prelevato un substrato di aggregato alla volta e si è eseguita la prova. Per prima cosa si è collegato il cavo che fornisce aria compressa allo strumento in modo da avere una pressione di massimo 200 psi. Si è poi acceso il display e ci si è assicurati che il valore iniziale e i valori “max” e “min” fossero zero. Si è poi collegato allo strumento il cavo che termina con il corpo del pistone; quest’ultimo è stato poi posizionato sul pistoncino; quindi, si è avvitato il piatto di reazione fino al contatto con il corpo del pistone senza forzare ulteriormente nella parte finale per evitare di precaricare il provino e alterare i risultati della prova. Si è poi tenuto premuto il tasto “run” con una mano e con l’altra la base del corpo del pistone finché non si è sentito il rumore del pistoncino che si è staccato dall’aggregato. Si è letto poi sul display il valore di pressione massima e si è osservato il tipo di rottura che si era creata. Tali operazioni sono state effettuate per tutti i pistoncini incollati sui vari tipi di substrati e nelle varie condizioni.



Figura 3.13 Strumento PATTI



Figura 3.14 Preparazione provini

## 4. Analisi dei risultati

Dalle prove eseguite secondo le procedure descritte nel capitolo precedente si sono ottenuti i risultati riportati qui di seguito.

### 4.1. Risultati delle prove di penetrazione

I valori ottenuti dalla prova di penetrazione sono stati riportati in questa tabella:

PROVA DI PENETRAZIONE (peso 100 g)							
<b>BITUME:</b>	<b>Ripetizioni:</b>	<b>valore 1 (dmm)</b>	<b>valore 2 (dmm)</b>	<b>valore 3 (dmm)</b>	<b>media (dmm)</b>	<b>Media corr.* (dmm)</b>	<b>Media (dmm)</b>
<b>HPMB_O</b>	ripetizione 1	54,90	52,00	48,30	51,73	53,45	<b>52,78</b>
	ripetizione 2	52,00	53,20	51,10	52,10	52,10	
<b>HPMB_V</b>	ripetizione 1	63,00	63,40	64,00	63,47	63,47	<b>60,80</b>
	ripetizione 2	56,80	58,20	59,40	58,13	58,13	
<b>HPMB_A</b>	ripetizione 1	30,30	31,20	31,10	30,87	30,87	<b>30,78</b>
	ripetizione 2	34,70	30,20	31,20	32,03	30,70	
<b>PMB</b>	ripetizione 1	31,10	32,30	32,80	32,07	32,07	<b>31,68</b>
	ripetizione 2	30,50	31,30	32,10	31,30	31,30	
* i valori in rosso sono stati esclusi dalla media sulle 3 determinazioni del singolo campione poiché fuori trend							

Tab. 4.1 Valori prova di penetrazione (peso del carico totale utilizzato pari a 100g)

Nell'ultima colonna che riporta il dato medio si può notare che il bitume HPMB\_V risulta il meno duro e il meno consistente rispetto agli altri tre bitumi testati. Esso è anche quello che contiene la maggior percentuale di polimeri SBS; non si può però definire una legge che lega il contenuto di polimeri e la consistenza di un bitume in quanto il bitume HPMB\_O e HPMB\_A hanno la stessa percentuale pari al 7,5% di polimeri ma i rispettivi valori di penetrazione risultano molto differenti. Hanno valori di penetrazione molto simili invece il bitume super-modificato HPMB\_A (7,5% SBS) e il bitume modificato HARD PMB (3,8% SBS). Essi risultano i più duri e consistenti, in particolare il bitume

HPMB\_A risulta il più duro, seguito poi dal PMB, dall'HPMB\_O e per ultimo l'HPMB\_V.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori forniti dai produttori e si è potuto notare che il PMB e l'HPMB\_A hanno riportato valori di penetrazione più bassi rispetto a quanto dichiarato (circa 50 dmm) mentre l'HPMB\_O e l'HPMB\_V sono risultati in linea con quanto dichiarato.

Sono state effettuate anche delle prove con peso pari a 110g anche se non previsto dalla normativa e si sono ottenuti questi valori:

PROVA DI PENETRAZIONE CON PESO 110 g							
<b><u>BITUME:</u></b>	<b>Ripetizioni:</b>	<b>valore 1 (dmm)</b>	<b>valore 2 (dmm)</b>	<b>valore 3 (dmm)</b>	<b>media (dmm)</b>	<b>Media corr.* (dmm)</b>	<b>Media (dmm)</b>
<b>HPMB_O</b>	ripetizione 1	58,50	54,10	60,00	57,53	59,25	<b>59,83</b>
	ripetizione 2	61,14	59,80	60,30	60,41	60,41	
<b>HPMB_V</b>	ripetizione 1	72,60	76,60	73,90	74,37	73,25	<b>72,14</b>
	ripetizione 2	68,80	71,70	72,60	71,03	71,03	
<b>HPMB_A</b>	ripetizione 1	36,80	37,10	39,60	37,83	37,83	<b>37,94</b>
	ripetizione 2	39,70	38,10	38,00	38,60	38,05	
<b>PMB</b>	ripetizione 1	34,00	30,90	28,50	31,13	32,45	<b>33,60</b>
	ripetizione 2	35,60	33,90	28,10	32,53	34,75	
* i valori in rosso sono stati esclusi dalla media sulle 3 determinazioni del singolo campione poiché fuori trend							

Tab. 4.2 Valori prova di penetrazione (peso del carico totale utilizzato pari a 110g)

Nell'ultima colonna, che riporta il valore medio per ogni bitume, si può osservare che la penetrazione risulta maggiore rispetto ai valori ottenuti nella tabella precedente proprio perché il bitume è stato sottoposto ad un peso maggiore ma risulta interessante rilevare che il trend rimanga il medesimo: l'HPMB\_V risulta essere il bitume più morbido, seguito dall'HPMB\_O e infine l'HPMB\_A e il PMB che, come in precedenza, riportano valori molto simili.

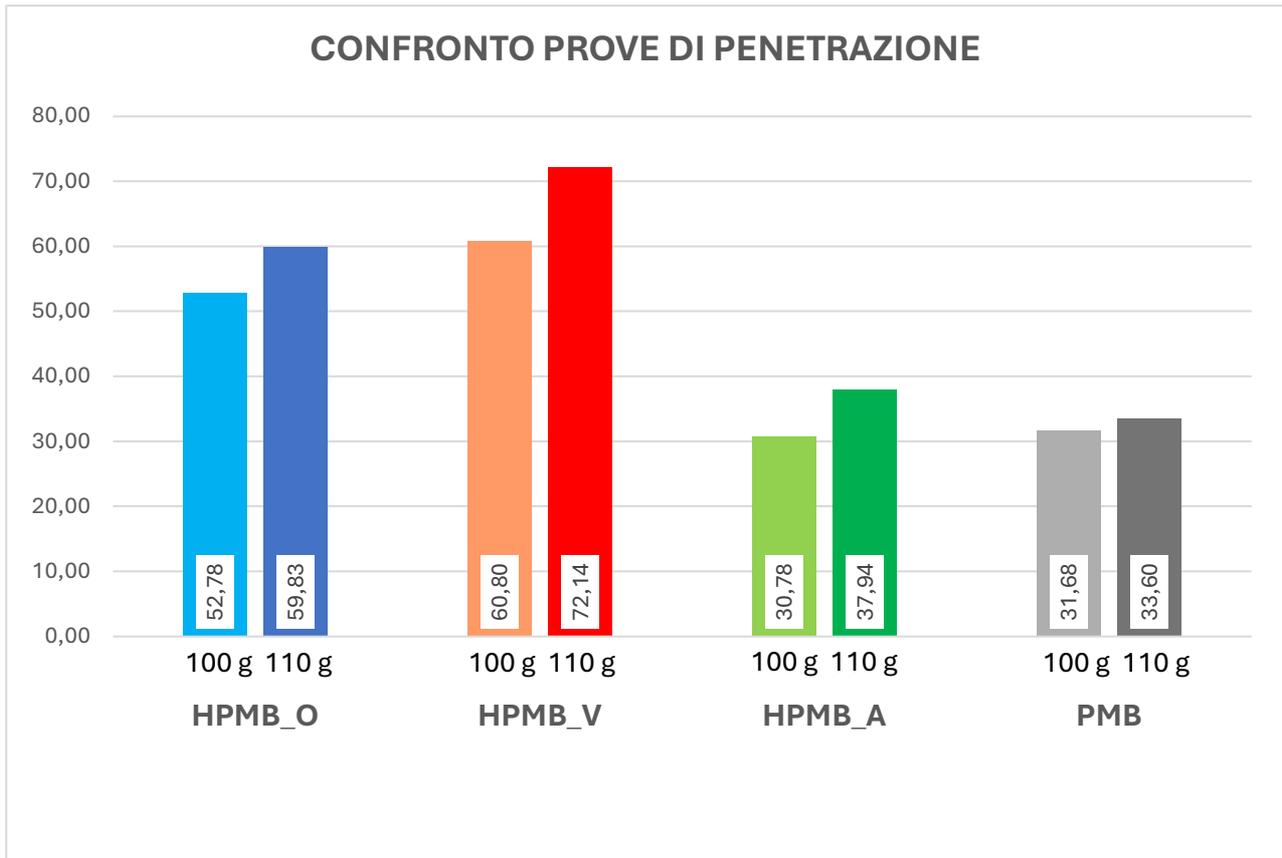


Fig. 4.1 Confronto dei risultati ottenuti dalla prova di penetrazione con peso 100g e 110g

#### 4.2. Risultati delle prove di Palla – Anello

I valori ottenuti dalle prove di palla-anello sono stati riportati in questa tabella:

<b>PROVE DI PALLA-ANELLO</b>						
<b>BITUME:</b>	<b>Ripetizioni:</b>	<b>valore LB right</b>	<b>valore LB left</b>	<b>differenza</b>	<b>media</b>	<b>Media</b>
<b>HPMB_A</b>	ripetizione 1	75,40	75,40	0,00	<b>75,40</b>	<b>75,23</b>
	ripetizione 2	75,00	75,10	0,10	<b>75,05</b>	
<b>HPMB_V</b>	ripetizione 1	79,90	80,00	0,10	<b>79,95</b>	<b>79,70</b>
	ripetizione 2	79,40	79,50	0,10	<b>79,45</b>	
<b>HPMB_O</b>	ripetizione 1	87,00	87,10	0,10	<b>87,05</b>	<b>87,28</b>
	ripetizione 2	87,50	87,50	0,00	<b>87,50</b>	
<b>PMB</b>	ripetizione 1	74,60	74,70	0,10	<b>74,65</b>	<b>74,80</b>
	ripetizione 2	75,00	74,90	0,10	<b>74,95</b>	

Tab. 4.3 Valori prova di palla-anello

Se si riportano i valori medi in un grafico a colonne si ottiene:

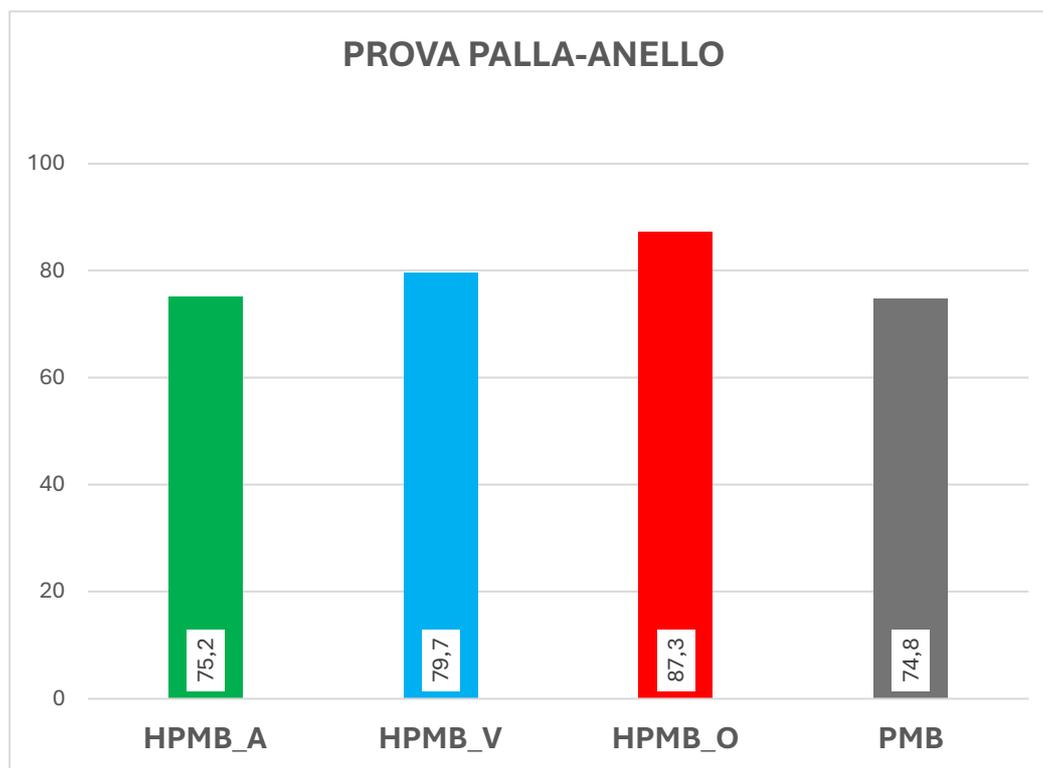


Fig. 4.2 Confronto tra i valori medi dei quattro bitumi

Si può notare che il bitume HPMB\_O è quello più resistente alle alte temperature in quanto ha un'elevata temperatura di rammollimento. L'HPMB\_A e il PMB possiedono temperature di rammollimento simili e risultano quelli con la temperatura di rammollimento più bassa. L'HPMB\_V riporta una temperatura inferiore all'HPMB\_O ma superiore all'HPMB\_A e al PMB.

La temperatura di rammollimento ottenuta per l'HPMB\_O risulta in linea con quanto scritto sulla scheda tecnica così come per l'HPMB\_A. Per l'HPMB\_V invece la temperatura è risultata più bassa di quanto dichiarato dai produttori.

### 4.3. Risultati nell'analisi della viscosità

I valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica sono riportati qui di seguito divisi per tipologia di bitume.

#### Bitume HPMB\_A

I valori delle analisi di viscosità nelle tabelle seguenti sono relativi al bitume di tipo HPMB\_A.

I parametri utilizzati per i calcoli sono stati:

Condizione	UN	UN
Spindle	S21	S27
Fattore di conversione	0,93	0,63

Temperatura T = 115°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	7,5	17,1	17	5.600,0	3,7	14,20	4,725
115	15,0	32,8	33	5.450,0	3,7	27,90	9,450
115	25,0	53,2	53	5.210,0	3,7	45,10	15,750
115	35,0	72,4	72	5.120,0	3,7	61,90	22,050
115	45,0	91,8	92	5.044,0	3,7	78,00	28,350

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	7,5	16,9	17	5.567,0	3,7	14,00	4,725
115	15,0	32,2	32	5.367,0	3,7	27,20	9,450
115	25,0	52,0	52	5.190,0	3,7	44,00	15,750
115	35,0	71,4	71	5.093,0	3,7	60,40	22,050
115	45,0	89,9	90	4.994,0	3,7	76,40	28,350

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
4,725	5.583,5
9,450	5.408,5
15,750	5.200,0
22,050	5.106,5
28,350	5.019,0

Tab. 4.4 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 115°C

## Temperatura T = 135°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	30,0	16,8	17	1.400,0	3,1	14,30	18,900
135	50,0	28,0	28	1.400,0	3,1	23,80	31,500
135	90,0	50,3	50	1.397,0	3,1	42,80	56,700
135	120,0	66,9	67	1.394,0	3,1	56,90	75,600
135	150,0	83,6	84	1.393,0	3,1	71,10	94,500

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	30,0	26,3	26	1.430,0	3,2	14,20	18,900
135	50,0	28,7	29	1.435,0	3,2	24,40	31,500
135	90,0	51,1	51	1.419,0	3,2	43,50	56,700
135	120,0	67,9	68	1.415,0	3,2	57,70	75,600
135	150,0	84,6	85	1.410,0	3,1	72,00	94,500

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
18,900	1.415,0
31,500	1.417,5
56,700	1.408,0
75,600	1.404,5
94,500	1.401,5

Tab. 4.5 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 135°C

## Temperatura T = 160°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	20,0	17,0	17	425,0	2,6	7,95	18,600
160	35,0	30,2	30	431,4	2,6	14,00	32,550
160	60,0	52,2	52	434,2	2,6	24,30	55,800
160	80,0	68,7	69	431,3	2,6	32,00	74,400
160	100,0	86,7	87	433,5	2,6	40,30	93,000

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	20,0	17,1	17	427,5	2,6	7,91	18,600
160	35,0	30,1	30	430,0	2,6	13,90	32,550
160	60,0	51,7	52	430,0	2,6	23,90	55,800
160	80,0	69,0	69	431,3	2,6	32,00	74,400
160	100,0	85,7	86	428,0	2,6	39,90	93,000

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
18,600	426,3
32,550	430,7
55,800	432,1
74,400	431,3
93,000	430,8

Tab. 4.6 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 160°C

Temperatura T = 180°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		(N/m <sup>2</sup> )	(s <sup>-1</sup> )
180	35,0	14,6	15	207,1	2,3	6,74	32,550
180	70,0	29,0	29	207,1	2,3	13,50	65,100
180	120,0	50,1	50	208,7	2,3	23,30	111,600
180	180,0	75,0	75	207,8	2,3	34,70	167,400
180	200,0	83,3	83	208,0	2,3	38,60	186,000

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		(N/m <sup>2</sup> )	(s <sup>-1</sup> )
180	35,0	14,6	15	208,6	2,3	6,79	32,550
180	70,0	29,3	29	208,6	2,3	13,60	65,100
180	120,0	50,4	50	209,6	2,3	23,30	111,600
180	180,0	75,1	75	208,9	2,3	35,10	167,400
180	200,0	83,7	84	209,0	2,3	38,80	186,000

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
32,550	207,9
65,100	207,9
111,600	209,2
167,400	208,4
186,000	208,5

Tab. 4.7 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 180°C

Il confronto della viscosità rilevata alle diverse temperature di prova relativa ad uno sforzo torcente del 50% è stato descritto nella seguente tabella :

Confronto test HPMB_A									
Temperatura	Test 1			Test 2			Media		
	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate
T	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR
[°C]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]
115	5.210,0	3,7	15,750	5.190,0	3,7	15,750	5.200,0	3,7	15,750
135	1.397,0	3,1	56,700	1.419,0	3,2	56,700	1.408,0	3,1	56,700
160	434,2	2,6	55,800	430,0	2,6	55,800	432,1	2,6	55,800
180	208,7	2,3	111,600	209,6	2,3	111,600	209,2	2,3	111,600

Tab. 4.8 Confronto viscosità a diverse temperature relativa ad uno sforzo torcente del 50%

### Bitume HPMB\_V

I valori delle analisi di viscosità nelle tabelle seguenti sono relativi al bitume di tipo HPMB\_V.

I parametri utilizzati per i calcoli sono stati:

Condizione	UN	UN
Spindle	S21	S27
Fattore di conversione	0,93	0,63

Temperatura T = 115°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	7,5	16,9	17	5.633,0	3,8	14,40	4,725
115	15,0	33,8	34	5.667,0	3,8	29,10	9,450
115	22,0	50,3	50	5.727,0	3,8	42,90	13,860
115	30,0	69,0	69	5.758,0	3,8	58,70	18,900
115	40,0	91,8	92	5.744,0	3,8	78,10	25,200

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	7,5	16,1	16	5.400,0	3,7	13,50	4,725
115	15,0	32,0	32	5.430,0	3,7	27,20	9,450
115	22,0	51,4	51	5.510,0	3,7	44,00	13,860
115	30,0	72,2	72	5.460,0	3,7	60,60	18,900
115	40,0	92,3	92	5.390,0	3,7	80,20	25,200

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
4,725	5.516,5
9,450	5.548,5
13,860	5.618,5
18,900	5.609,0
25,200	5.567,0

Tab. 4.9 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 115°C

Temperatura T = 135°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	15,0	15,4	15	2.550,0	3,4	13,00	9,450
135	30,0	29,7	30	2.475,0	3,4	25,20	18,900
135	50,0	48,1	48	2.395,0	3,4	40,50	31,500
135	70,0	64,9	65	2.311,0	3,4	54,90	44,100
135	100,0	90,8	91	2.265,0	3,4	76,80	63,000

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	15,0	15,8	16	2.630,0	3,4	13,90	9,450
135	30,0	31,7	32	2.535,0	3,4	26,90	18,900
135	50,0	51,9	52	2.433,0	3,4	44,00	31,500
135	70,0	67,1	67	2.392,0	3,4	58,70	44,100
135	100,0	91,4	91	2.317,0	3,4	78,60	63,000

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
9,450	2.590,0
18,900	2.505,0
31,500	2.414,0
44,100	2.351,5
63,000	2.291,0

Tab. 4.10 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 135°C

## Temperatura T = 160°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	10,0	16,6	17	825,0	2,9	7,63	9,300
160	20,0	32,0	32	800,0	2,9	14,90	18,600
160	30,0	47,5	48	790,0	2,9	21,90	27,900
160	45,0	71,6	72	793,3	2,9	33,20	41,850
160	60,0	94,6	95	785,0	2,9	43,80	55,800

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	10,0	16,5	17	810,0	2,9	7,77	9,300
160	20,0	31,9	32	790,0	2,9	14,80	18,600
160	30,0	47,5	48	791,7	2,9	22,00	27,900
160	45,0	70,1	70	782,2	2,9	32,60	41,850
160	60,0	93,5	94	778,3	2,9	43,30	55,800

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
9,300	817,5
18,600	795,0
27,900	790,9
41,850	787,8
55,800	781,7

Tab. 4.11 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 160°C

## Temperatura T = 180°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
180	20,0	15,4	15	385,0	2,6	7,16	18,600
180	35,0	26,9	27	382,9	2,6	12,50	32,550
180	70,0	53,4	53	381,4	2,6	24,90	65,100
180	100,0	75,5	76	378,5	2,6	35,20	93,000
180	120,0	90,9	91	378,7	2,6	42,30	111,600

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
180	20,0	15,4	15	385,0	2,6	7,16	18,600
180	35,0	26,8	27	381,4	2,6	12,40	32,550
180	70,0	53,3	53	380,0	2,6	24,80	65,100
180	100,0	76,2	76	380,0	2,6	35,20	93,000
180	120,0	91,2	91	379,6	2,6	42,50	111,600

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
18,600	385,0
32,550	382,2
65,100	380,7
93,000	379,3
111,600	379,2

Tab. 4.12 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 180°C

Il confronto della viscosità rilevata alle diverse temperature di prova è riportato in seguito:

Confronto test HPMB_V									
Temperatura	Test 1			Test 2			Media		
	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate
T	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR
[°C]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s <sup>-1</sup> ]
115	5.727,0	3,8	13,860	5.510,0	3,7	13,860	5.618,5	3,7	13,860
135	2.395,0	3,4	31,500	2.433,0	3,4	31,500	2.414,0	3,4	31,500
160	790,0	2,9	27,900	791,7	2,9	27,900	790,9	2,9	27,900
180	381,4	2,6	65,100	380,0	2,6	65,100	380,7	2,6	65,100

Tab. 4.13 Confronto viscosità a diverse temperature relativa ad uno sforzo torcente del 50%

### Bitume HPMB\_O

I valori delle analisi di viscosità nelle tabelle seguenti sono relativi al bitume di tipo HPMB\_O.

I parametri utilizzati per i calcoli sono stati:

Condizione	UN	UN
Spindle	S21	S27
Fattore di conversione	0,93	0,63

## Temperatura T = 115°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	3,0	16,6	17	13.833,0	4,1	14,10	1,890
115	6,0	31,3	31	13.000,0	4,1	26,50	3,780
115	10,0	50,8	51	12.725,0	4,1	43,60	6,300
115	15,0	77,7	78	12.938,0	4,1	66,20	9,450
115	17,0	88,2	88	12.956,0	4,1	75,00	10,710

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	3,0	15,3	15	13.000,0	4,1	13,00	1,890
115	6,0	30,1	30	12.750,0	4,1	25,20	3,780
115	10,0	49,5	50	12.675,0	4,1	42,50	6,300
115	15,0	76,1	76	12.733,0	4,1	65,10	9,450
115	17,0	87,2	87	12.759,0	4,1	73,60	10,710

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
1,890	13.416,5
3,780	12.875,0
6,300	12.700,0
9,450	12.835,5
10,710	12.857,5

Tab. 4.14 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 115°C

## Temperatura T = 135°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	15,0	16,4	16	2.717,0	3,4	13,90	9,450
135	30,0	32,1	32	2.675,0	3,4	27,30	18,900
135	50,0	52,0	52	2.605,0	3,4	44,30	31,500
135	70,0	72,6	73	2.593,0	3,4	61,70	44,100
135	90,0	92,7	93	2.578,0	3,4	79,00	56,700

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	15,0	15,7	16	2.600,0	3,4	13,30	9,450
135	30,0	31,9	32	2.650,0	3,4	27,10	18,900
135	50,0	51,9	52	2.595,0	3,4	43,90	31,500
135	70,0	71,5	72	2.554,0	3,4	60,90	44,100
135	90,0	91,3	91	2.542,0	3,4	77,80	56,700

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
9,450	2.658,5
18,900	2.662,5
31,500	2.600,0
44,100	2.573,5
56,700	2.560,0

Tab. 4.15 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 135°C

Temperatura T = 160°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	12,0	14,8	15	608,3	2,8	6,97	11,160
160	25,0	30,3	30	606,0	2,8	13,90	23,250
160	45,0	53,7	54	598,9	2,8	25,00	41,850
160	60,0	71,4	71	594,2	2,8	33,10	55,800
160	80,0	94,7	95	593,1	2,8	44,00	74,400

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	12,0	14,5	15	592,5	2,8	6,82	11,160
160	25,0	29,3	29	590,0	2,8	13,00	23,250
160	45,0	51,9	52	574,4	2,8	23,70	41,850
160	60,0	69,0	69	569,7	2,8	31,50	55,800
160	80,0	92,1	92	565,0	2,8	42,90	74,400

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
11,160	600,4
23,250	598,0
41,850	586,7
55,800	582,0
74,400	579,1

Tab. 4.16 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 160°C

## Temperatura T = 180°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
180	25,0	14,9	15	296,0	2,5	6,88	23,250
180	50,0	29,2	29	292,0	2,5	13,60	46,500
180	90,0	51,7	52	287,8	2,5	24,00	83,700
180	120,0	68,9	69	287,1	2,5	32,00	111,600
180	160,0	91,9	92	286,9	2,5	42,60	148,800

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
180	25,0	14,6	15	274,0	2,4	6,56	23,250
180	50,0	28,7	29	277,0	2,4	12,90	46,500
180	90,0	49,9	50	277,2	2,4	23,10	83,700
180	120,0	66,8	67	278,3	2,4	31,10	111,600
180	160,0	88,6	89	277,2	2,4	41,30	148,800

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
23,250	285,0
46,500	284,5
83,700	282,5
111,600	282,7
148,800	282,1

Tab. 4.17 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 180°C

Il confronto della viscosità rilevata alle diverse temperature di prova relativa ad uno sforzo torcente del 50% è rappresentato nella seguente tabella:

Confronto test HPMB_0									
Temperatura	Test 1			Test 2			Media		
	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate
T	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR
[°C]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]
115	12.725,0	4,1	6,300	12.675,0	4,1	6,300	12.700,0	4,1	6,300
135	2.605,0	3,4	31,500	2.595,0	3,4	31,500	2.600,0	3,4	31,500
160	598,9	2,8	41,850	574,4	2,8	41,850	586,7	2,8	41,850
180	287,8	2,5	83,700	277,2	2,4	83,700	282,5	2,5	83,700

Tab. 4.18 Confronto viscosità a diverse temperature relativa ad uno sforzo torcente del 50%

## Bitume PMB

I valori delle analisi di viscosità nelle tabelle seguenti sono relativi al bitume di tipo PMB.

I parametri utilizzati per i calcoli sono stati:

Condizione	UN	UN
Spindle	S21	S27
Fattore di conversione	0,93	0,63

Temperatura T = 115°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	6,0	14,6	15	6.000,0	3,8	12,20	3,780
115	12,0	28,4	28	5.917,0	3,8	24,10	7,560
115	22,0	51,7	52	5.886,0	3,8	44,00	13,860
115	30,0	70,3	70	5.858,0	3,8	59,80	18,900
115	40,0	92,5	93	5.787,0	3,8	79,00	25,200

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
115	6,0	14,4	14	5.900,0	3,8	11,60	3,780
115	12,0	27,1	27	5.813,0	3,8	21,90	7,560
115	22,0	50,4	50	5.795,0	3,8	42,10	13,860
115	30,0	69,9	70	5.742,0	3,8	56,60	18,900
115	40,0	92,0	92	5.675,0	3,8	76,30	25,200

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
3,780	5.950,0
7,560	5.865,0
13,860	5.840,5
18,900	5.800,0
25,200	5.731,0

Tab. 4.19 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 115°C

## Temperatura T = 135°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	22,0	14,7	15	1.670,0	3,2	12,50	13,860
135	45,0	30,2	30	1.678,0	3,2	25,70	28,350
135	75,0	49,5	50	1.647,0	3,2	42,10	47,250
135	120,0	77,5	78	1.615,0	3,2	65,90	75,600
135	150,0	95,8	96	1.597,0	3,2	81,40	94,500

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
135	22,0	14,4	14	1.681,0	3,2	11,80	13,860
135	45,0	29,7	30	1.659,0	3,2	24,60	28,350
135	75,0	48,7	49	1.633,0	3,2	41,90	47,250
135	120,0	76,3	76	1.610,0	3,2	64,30	75,600
135	150,0	94,3	94	1.578,0	3,2	79,60	94,500

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
13,860	1.675,5
28,350	1.668,5
47,250	1.640,0
75,600	1.612,5
94,500	1.587,5

Tab. 4.20 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 135°C

## Temperatura T = 160°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	15,0	16,6	17	556,0	2,7	7,77	13,950
160	25,0	27,9	28	558,0	2,7	12,70	23,250
160	45,0	49,2	49	544,4	2,7	22,60	41,850
160	70,0	75,3	75	537,0	2,7	34,90	65,100
160	80,0	86,0	86	536,3	2,7	39,60	74,400

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
160	15,0	16,0	16	554,0	2,7	7,39	13,950
160	25,0	25,9	26	556,3	2,7	11,80	23,250
160	45,0	48,1	48	541,5	2,7	21,30	41,850
160	70,0	74,4	74	533,6	2,7	33,20	65,100
160	80,0	85,6	86	534,3	2,7	37,80	74,400

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
13,950	555,0
23,250	557,2
41,850	543,0
65,100	535,3
74,400	535,3

Tab. 4.21 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 160°C

Temperatura T = 180°C

Test 1							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
180	30,0	16,3	16	271,1	2,4	7,67	27,900
180	60,0	31,9	32	266,7	2,4	15,10	55,800
180	100,0	52,8	53	265,0	2,4	24,60	93,000
180	135,0	71,0	71	263,0	2,4	32,90	125,550
180	180,0	94,0	94	261,1	2,4	43,70	167,400

Test 2							
Temperatura	Velocità angolare	Sforzo Torcente	Sforzo Torcente di Progetto	Viscosità		Shear Stress	Shear Rate
T	$\omega$	$\mu$	$\mu_b$	$\eta$	$\log\eta$	SS	SR
[°C]	[RPM]	[%]	[%]	[mPa*s]		[N/m <sup>2</sup> ]	[s <sup>-1</sup> ]
180	30,0	15,8	16	269,8	2,4	7,22	27,900
180	60,0	29,5	30	264,9	2,4	14,20	55,800
180	100,0	51,9	52	263,0	2,4	23,10	93,000
180	135,0	68,9	69	261,2	2,4	29,90	125,550
180	180,0	93,2	93	260,6	2,4	43,50	167,400

Media Test 1 - Test 2	
Shear Rate	Viscosità
SR	$\eta$
[s <sup>-1</sup> ]	[mPa*s]
27,900	270,5
55,800	265,8
93,000	264,0
125,550	262,1
167,400	260,9

Tab. 4.22 Valori ottenuti dalla prova di viscosità dinamica alla temperatura di 180°C

Il confronto della viscosità rilevata alle diverse temperature di prova relativa ad uno sforzo torcente del 50% è descritto nella seguente tabella:

Confronto test PMB									
Temperatura	Test 1			Test 2			Media		
	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate	Viscosità		Shear Rate
T	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR	$\eta$	$\log\eta$	SR
[°C]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]	[mPa*s]	[mPa*s]	[s-1]
115	5.886,0	3,8	13,860	5.795,0	3,8	13,860	5.840,5	3,8	13,860
135	1.647,0	3,2	47,250	1.633,0	3,2	47,250	1.640,0	3,2	47,250
160	544,4	2,7	41,850	541,5	2,7	41,850	543,0	2,7	41,850
180	265,0	2,4	93,000	263,0	2,4	93,000	264,0	2,4	93,000

Tab. 4.23 Confronto viscosità a diverse temperature relativa ad uno sforzo torcente del 50%

Si rappresentano nei grafici seguenti i confronti dei risultati relativi ai quattro tipi di bitumi analizzati.

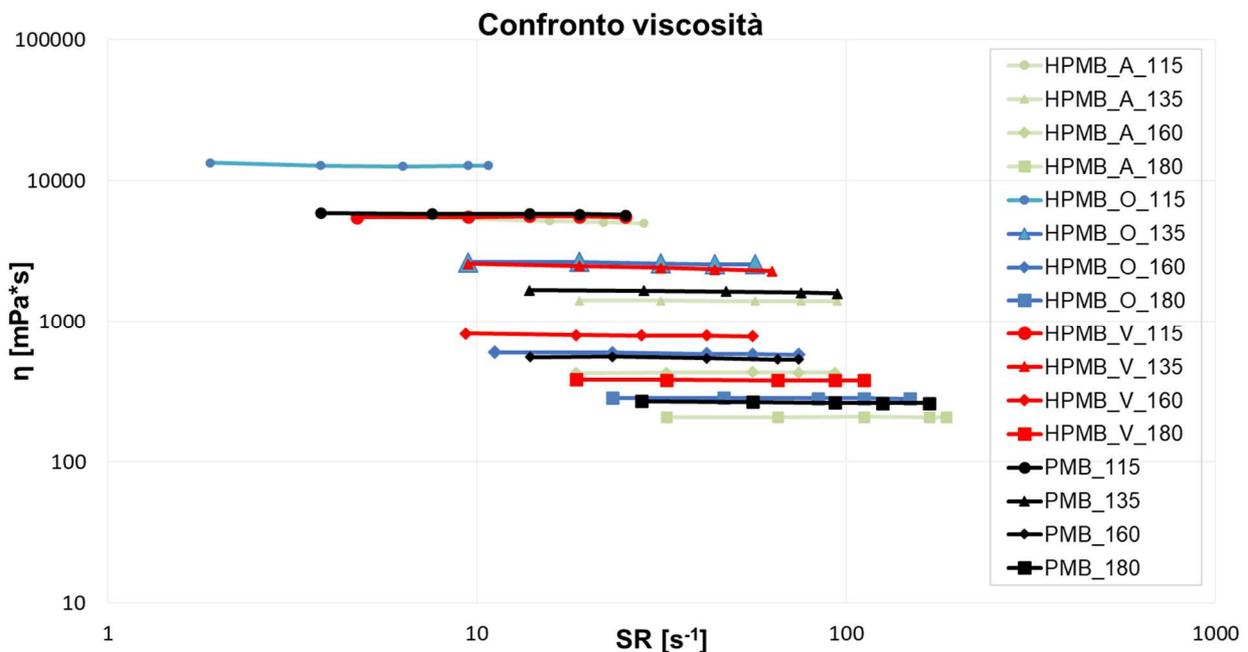


Fig. 4.3 Grafico viscosità  $\eta$  – shear rate SR

Tale grafico rappresenta la viscosità in funzione dello shear rate. Si può notare come la viscosità risulti essere una grandezza indipendente dallo shear stress e dallo shear rate: questa è una conseguenza dell'equazione di Newton. L'equazione di Newton è l'equazione di una retta che parte dall'origine degli assi dove la viscosità rappresenta il fattore di proporzionalità (pendenza) tra lo shear stress e la shear rate:  $SS = \eta \cdot SR$ . Tutti i sistemi che seguono la legge di Newton sono definiti fluidi newtoniani e quindi si può affermare i bitumi oggetto di studio sono fluidi newtoniani.

Si può osservare che la viscosità a 115°C coincide per il PMB, per l'HPMB\_V e per l'HPMB\_A mentre l'HPMB\_O presenta una viscosità più elevata degli altri bitumi. A 135°C si può notare che l'HPMB\_O e l'HPMB\_V hanno la stessa viscosità mentre il PMB e l'HPMB\_A hanno una viscosità leggermente più bassa. A 160°C la viscosità più elevata è quella dell'HPMB\_V seguita da quella dell'HPMB\_O e del PMB che quasi coincidono e per finire quella dell'HPMB\_A che è quasi coincidente con quella dell'HPMB\_V a 180°C. Per quest'ultima temperatura troviamo l'HPMB\_O e il PMB che hanno viscosità quasi analoga e minore dell'HPMB\_V ed infine si posiziona l'HPMB\_A con la viscosità più bassa di tutti.

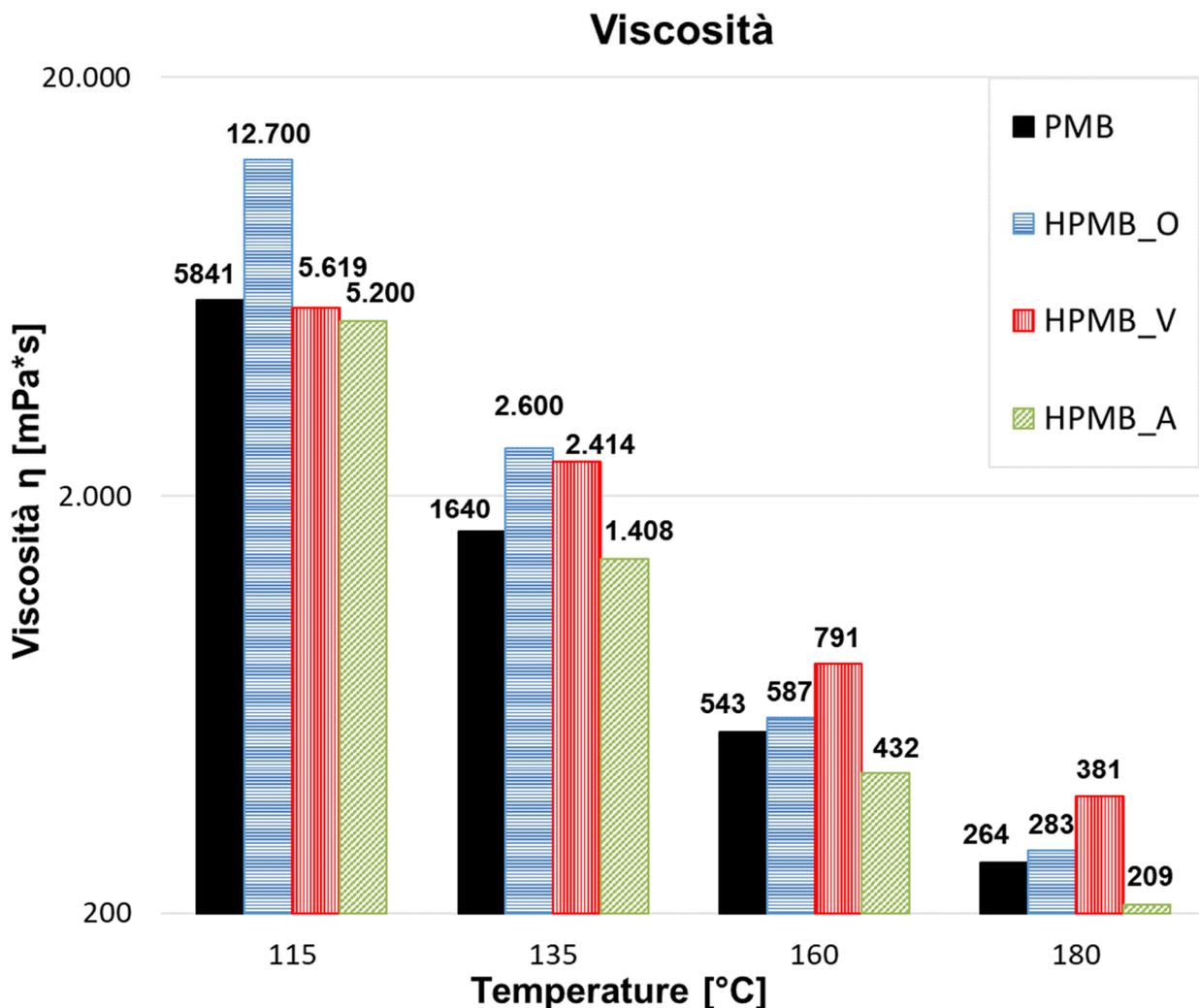


Fig. 4.4 Grafico viscosità  $\eta$  – temperatura T

Il presente grafico a colonne riporta la viscosità relativa al 50% del torcente in funzione della temperatura. Come si è già notato in precedenza l'HPMB\_O ha

viscosità maggiori rispetto agli altri bitumi per la temperatura di 115°C e 135°C mentre per la temperatura di 160°C e 180°C la viscosità maggiore è quella dell'HPMB\_V. Infine l'HPMB\_A presenta le viscosità più basse di tutti gli altri bitumi per qualsiasi temperatura.

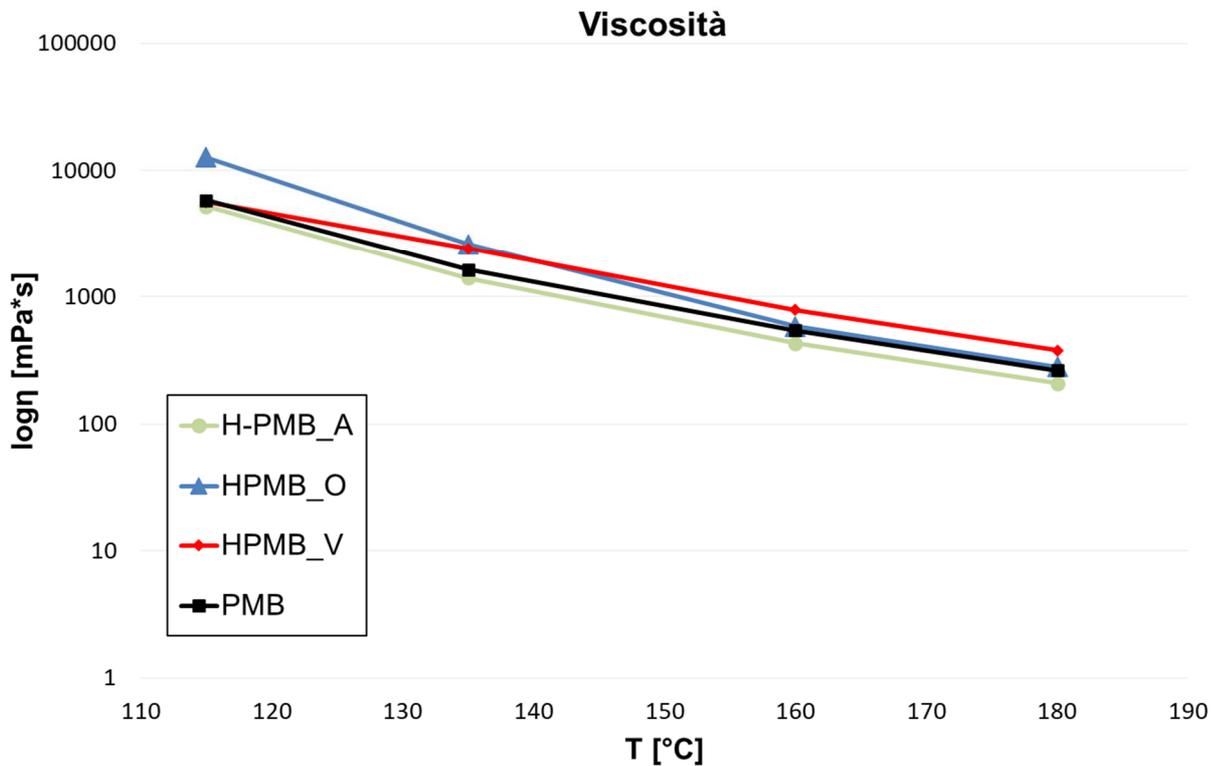


Fig. 4.5 Grafico logη – temperatura T

Il grafico sopra riportato mette in relazione il logaritmo della viscosità con la temperatura. Si può notare che la viscosità dell'HPMB\_O dipende notevolmente da quest'ultima. Il PMB e l'HPMB\_A hanno viscosità molto simile per tutte le temperature e risultano essere meno dipendenti dalla temperatura rispetto all'HPMB\_O. L'HPMB\_V riporta poca differenza tra il valore iniziale di viscosità a 115°C e quello finale a 180°C per cui si può affermare che è il meno dipendente dalla temperatura di tutti gli altri bitumi testati.

#### 4.4. Risultati delle prove Binder Bond Strength (BBS)

I valori ottenuti dalla prova BBS sono riportati qui di seguito divisi per tipologia di bitume, per condizione di prova e per tipo di substrato.

##### 4.4.1. Valori Binder Bond Strength (BBS) – Aggregati Vergini

I valori riportati di seguito sono relativi agli aggregati vergini.

#### Bitume HPMB\_A

<b>HPMB_A Dry Calcare</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	28,8	279,9	1.929,8	A
2	29,0	319,1	2.199,9	A
3	24,7	239,9	1.654,2	A
4	24,6	238,9	1.647,5	A
5	28,3	275,0	1.896,2	A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.865,5</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>228,6</b>		
<b>CV</b>		<b>12,3</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.24 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni dry

<b>HPMB_A Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	27,4	301,4	2.078,1	A
2	26,5	291,5	2.009,6	A
3	25,9	284,8	1.964,0	A
4	28,3	275,0	1.896,2	A
5	28,4	276,0	1.902,9	A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.970,2</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>76,2</b>		
<b>CV</b>		<b>3,9</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.25 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

<b>HPMB_A Wet Calcare</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	29,9	290,6	2.003,8	A
2	29,8	289,6	1.997,0	A
3	29,6	325,7	2.245,5	A
4	30,1	292,6	2.017,2	A
5	29,8	327,9	2.260,8	A
<b>AVERAGE</b>			<b>2.104,9</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>135,7</b>		
<b>CV</b>		<b>6,4</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.26 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni wet

<b>HPMB_A Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	27,8	270,1	1.862,6	A
2	27,9	271,1	1.869,3	A
3	28,2	274,0	1.889,5	A
4	27,6	303,6	2.093,3	A
5	28,3	275,0	1.896,2	A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.922,2</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>96,7</b>		
<b>CV</b>		<b>5,0</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.27 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni wet

<b>HPMB_A CONFRONTO AGGREGATI VERGINI</b>		
<b>AGGREGATI</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DEV. STD.</b>
HPMB_A Dry Calcare	1.865,5	228,6
HPMB_A Dry Basalto	1.970,2	76,2
HPMB_A Wet Calcare	2.104,9	135,7
HPMB_A Wet Basalto	1.922,2	96,7

Tab. 4.28 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

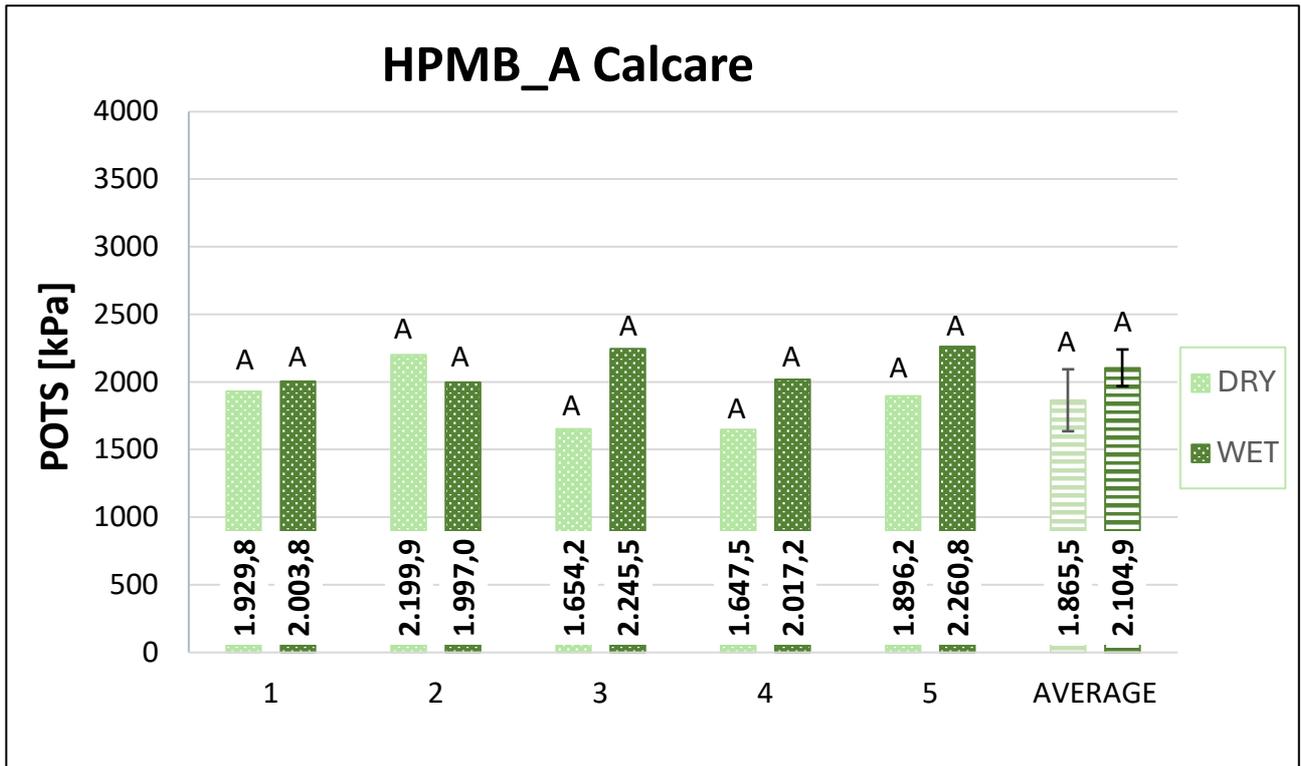


Fig. 4.6 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo vergine in condizioni dry e wet

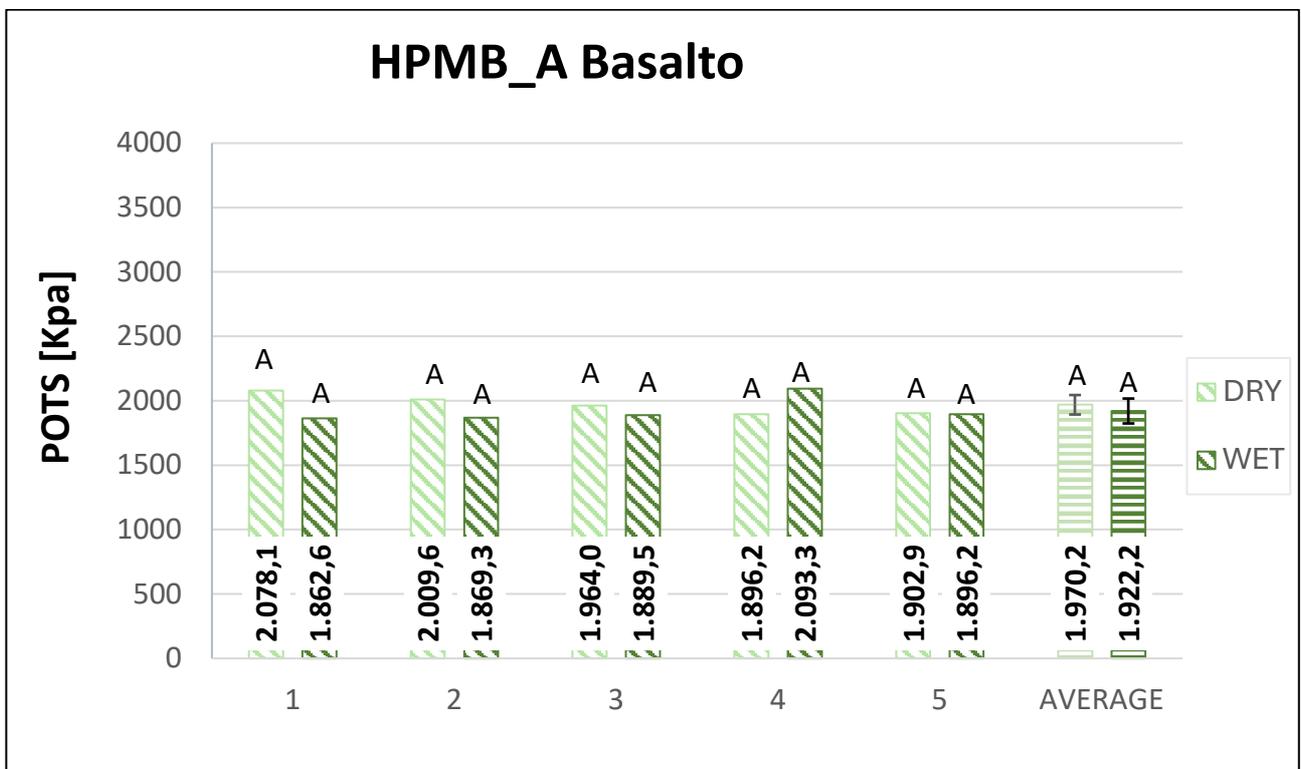


Fig. 4.7 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico vergine in condizioni dry e wet

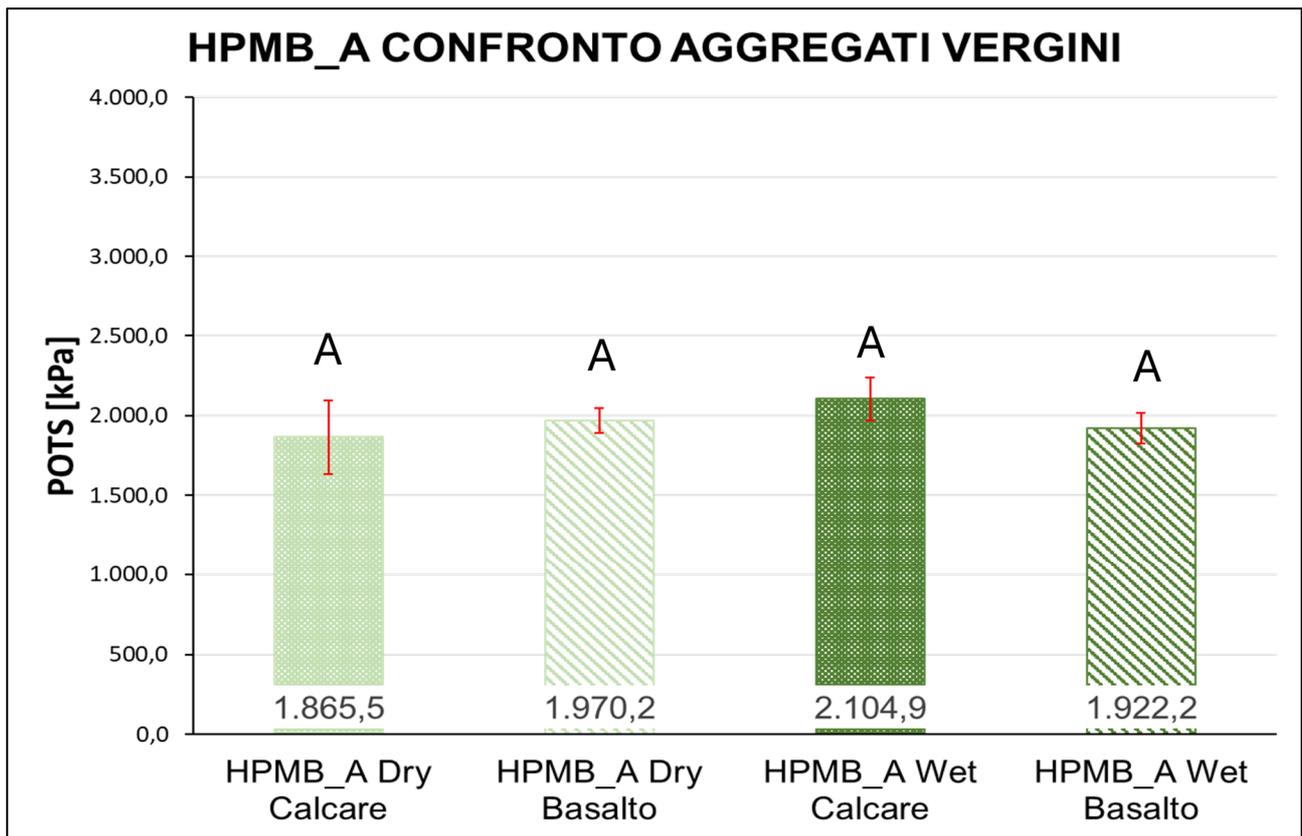


Fig. 4.8 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Figura 4.9 Rottura adesiva, aggregato calcareo



Figura 4.10 Rottura adesiva, aggregato basaltico

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare che il bitume di tipo HPMB\_A riporta sempre una rottura di tipo adesivo indipendentemente dalla condizione di prova (dry o wet) e dal tipo di substrato (calcareo o basalto). Si può affermare quindi che per il legante HPMB\_A la coesione interna prevale sulle proprietà adesive tra legante e aggregato.

## Bitume HPMB\_V

HPMB_V Dry Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	21,7	238,5	1.644,3	I
2	20,6	199,9	1.378,5	A
3	20,8	201,9	1.392,0	A
4	21,5	208,7	1.439,0	I
5	21,2	205,8	1.418,9	I
<b>AVERAGE</b>			<b>1.454,6</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>108,6</b>		
<b>CV</b>		<b>7,5</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.29 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni dry

Il tipo di rottura “I” ha significato di “**Indesiderata**” ovvero il bitume si stacca dal pistoncino e ciò non consente di determinare le proprietà adesive o coesive del legante.

HPMB_V Dry Basalto				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	21,6	237,4	1.636,7	I
2	22,5	218,5	1.506,3	I
3	23,4	227,2	1.566,8	I
4	21,8	211,6	1.459,2	I
5	22,0	213,6	1.472,7	I
<b>AVERAGE</b>			<b>1.528,3</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>73,5</b>		
<b>CV</b>		<b>4,8</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.30 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

<b>HPMB_V Wet Calcare</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	26,1	287,1	1.979,2	A
2	26,3	255,5	1.761,7	A
3	26,4	256,5	1.768,5	A
4	25,6	281,5	1.941,1	A
5	26,0	252,6	1.741,6	A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.838,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>112,4</b>		
<b>CV</b>		<b>6,1</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.31 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni wet

<b>HPMB_V Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	25,1	243,8	1.681,1	I
2	24,8	240,9	1.660,9	I
3	24,7	239,9	1.654,2	I
4	25,2	277,1	1.910,7	A
5	24,9	241,9	1.667,6	A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.714,9</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>109,9</b>		
<b>CV</b>		<b>6,4</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.32 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni wet

<b>HPMB_V CONFRONTO AGGREGATI VERGINI</b>		
<b>AGGREGATI</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DEV. STD.</b>
<b>HPMB_V Dry Calcare</b>	<b>1.454,6</b>	<b>108,6</b>
<b>HPMB_V Dry Basalto</b>	<b>1.528,3</b>	<b>73,5</b>
<b>HPMB_V Wet Calcare</b>	<b>1.838,4</b>	<b>112,4</b>
<b>HPMB_V Wet Basalto</b>	<b>1.714,9</b>	<b>109,9</b>

Tab. 4.33 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

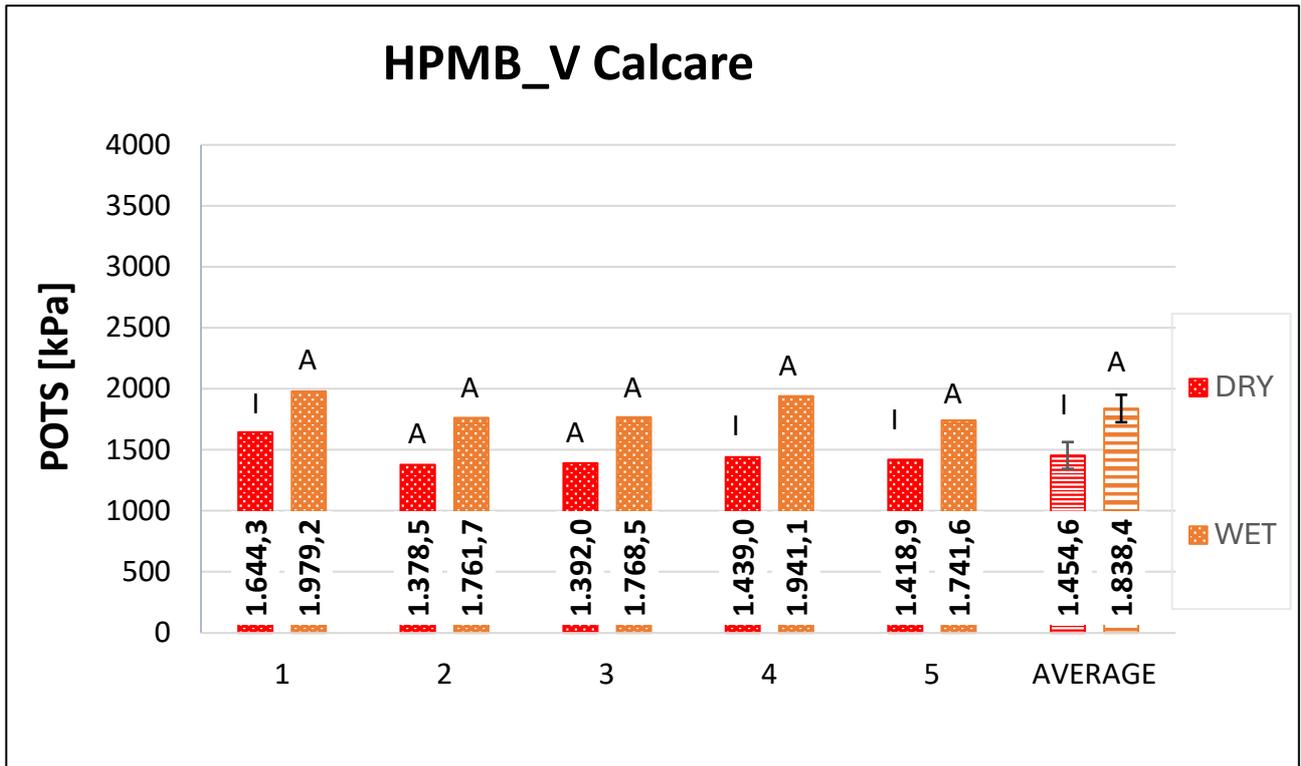


Fig.4.11 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo vergine in condizioni dry e wet

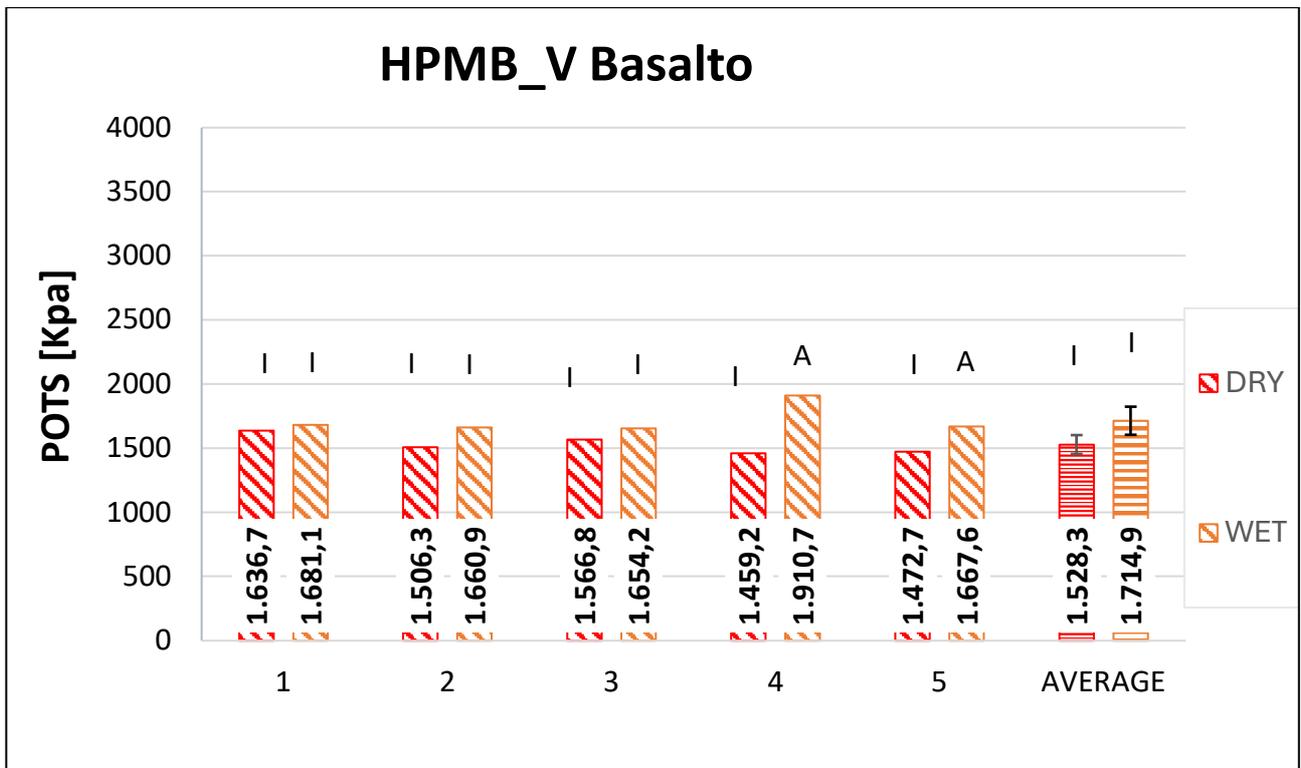


Fig.4.12 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico vergine in condizioni dry e wet

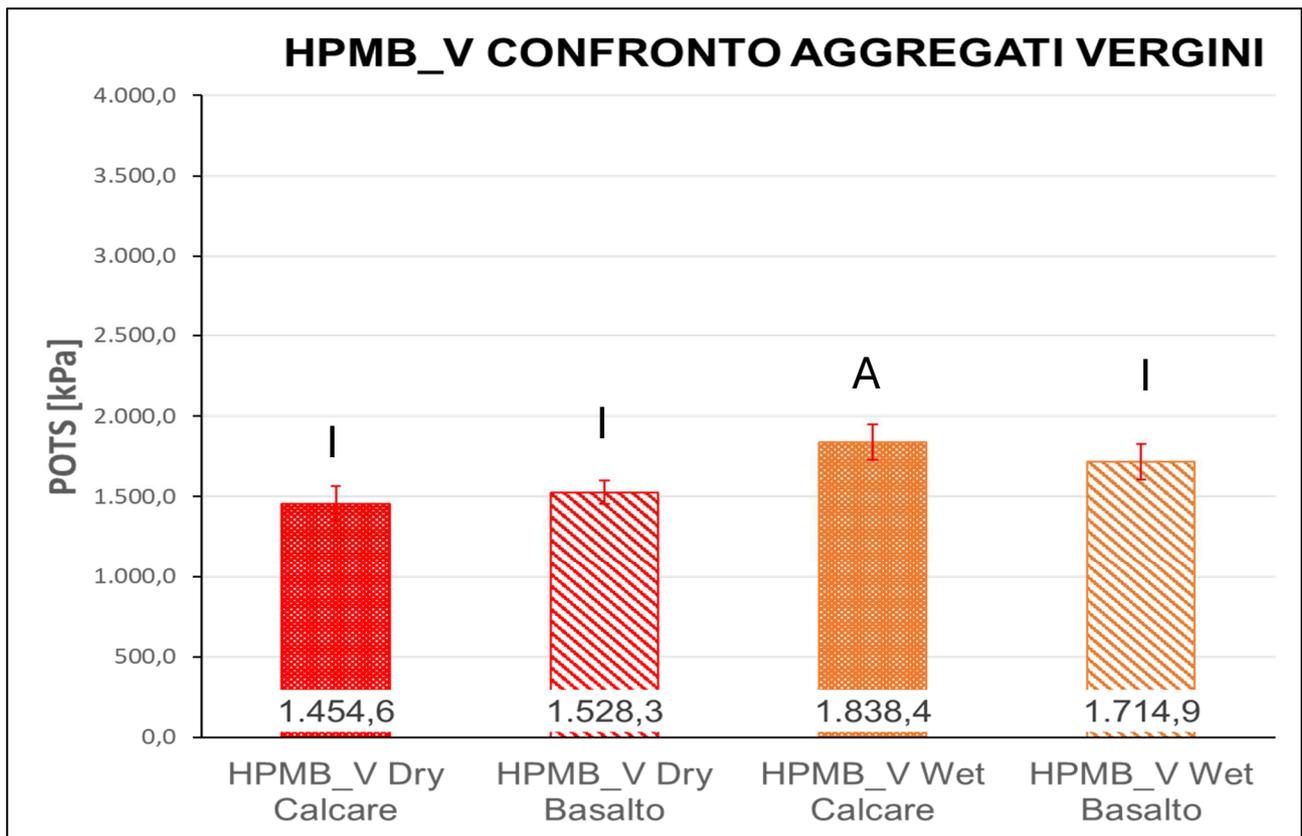


Fig. 4.13 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet

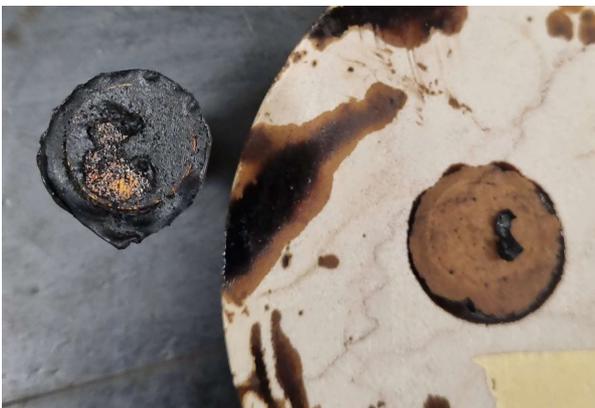


Fig. 4.14 Rottura indesiderata



Fig. 4.15 Rottura adesiva

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si possono notare le difficoltà riscontrate nell'analizzare questo bitume. Si sono verificate rotture indesiderate che non hanno permesso di valutare le proprietà adesive del legante HPMB\_V. L'unica condizione per cui si sono ottenuti risultati definiti è la condizione wet in cui si è utilizzato il calcare come substrato. In quest'ultimo caso si è verificata una rottura adesiva.

## Bitume PMB

PMB Dry Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	48,9	475,9	3.281,1	C
2	40,5	394,0	2.716,4	C
3	44,9	436,9	3.012,1	C
4	39,9	439,4	3.029,4	C
5	44,7	434,9	2.998,7	C
<b>AVERAGE</b>			<b>3.007,5</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>200,1</b>		
<b>CV</b>		<b>6,7</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.34 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni dry

PMB Dry Basalto				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	36,9	358,9	2.474,3	C
2	48,1	468,1	3.227,3	C
3	15,4	149,2	1.029,0	C
4	49,2	478,8	3.301,2	C
5	51,9	505,1	3.482,7	C
<b>AVERAGE</b>			<b>3.121,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>444,5</b>		
<b>CV</b>		<b>14,2</b>		<b>[%]</b>
* Il terzo valore, risultato fuori trend, dunque, è stato escluso dal calcolo della media e della deviazione standard				

Tab. 4.35 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

PMB Wet Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	40,7	395,9	2.729,8	C
2	39,4	383,2	2.642,4	C
3	48,5	472,0	3.254,2	C
4	38,2	371,5	2.561,7	C
5	38,3	372,5	2.568,5	C
<b>AVERAGE</b>			<b>2.751,3</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>289,2</b>		
<b>CV</b>		<b>10,5</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.35 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni wet

<b>PMB Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	
1	42,7	415,4	2.864,3	C
2	43,1	419,3	2.891,1	C
3	40,2	391,0	2.696,2	C
4	41,5	403,7	2.783,6	C
5	39,9	388,1	2.676,0	C
<b>AVERAGE</b>			<b>2.782,2</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>96,5</b>		
<b>CV</b>		<b>3,5</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.36 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni wet

<b>PMB CONFRONTO AGGREGATI VERGINI</b>		
AGGREGATI	MEDIA	DEV. STD.
PMB Dry Calcare	3.007,5	200,1
PMB Dry Basalto	3.121,4	444,5
PMB Wet Calcare	2.751,3	289,2
PMB Wet Basalto	2.782,2	96,5

Tab. 4.37 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

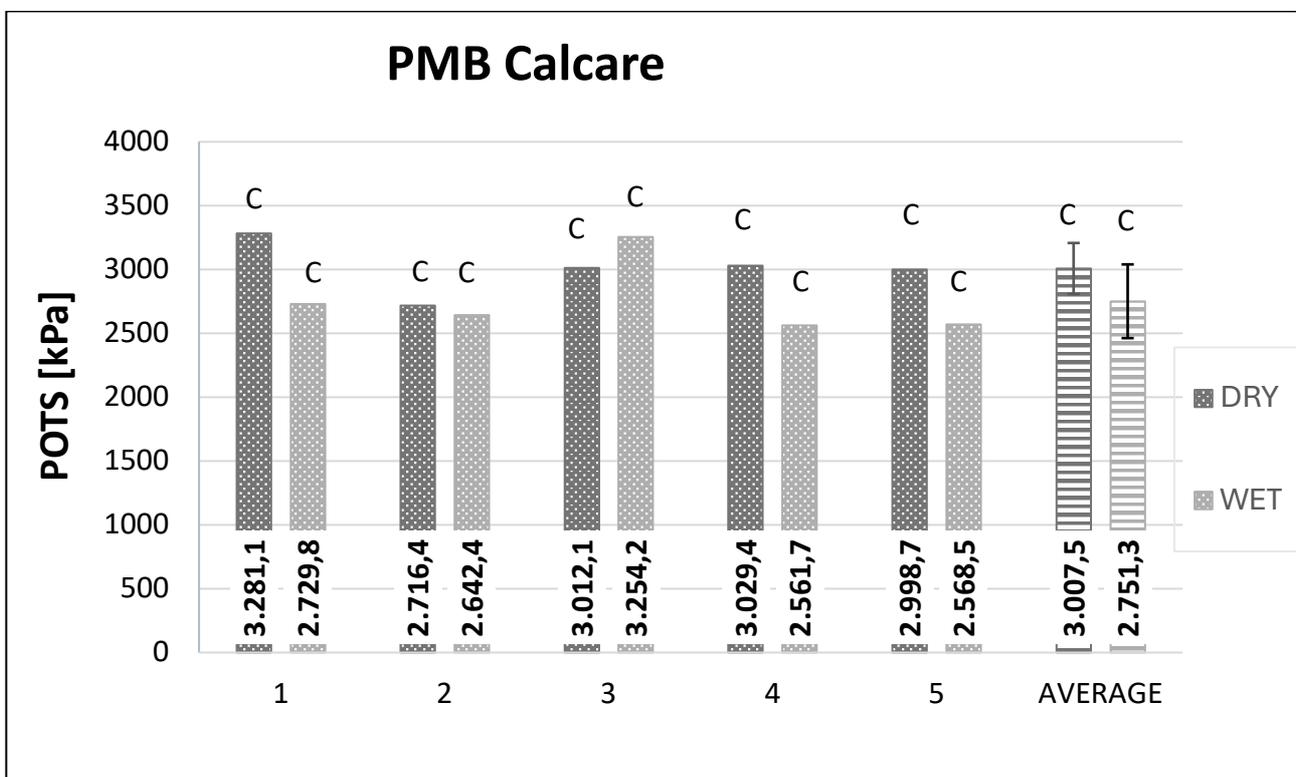


Fig.4.16 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo vergine in condizioni dry e wet

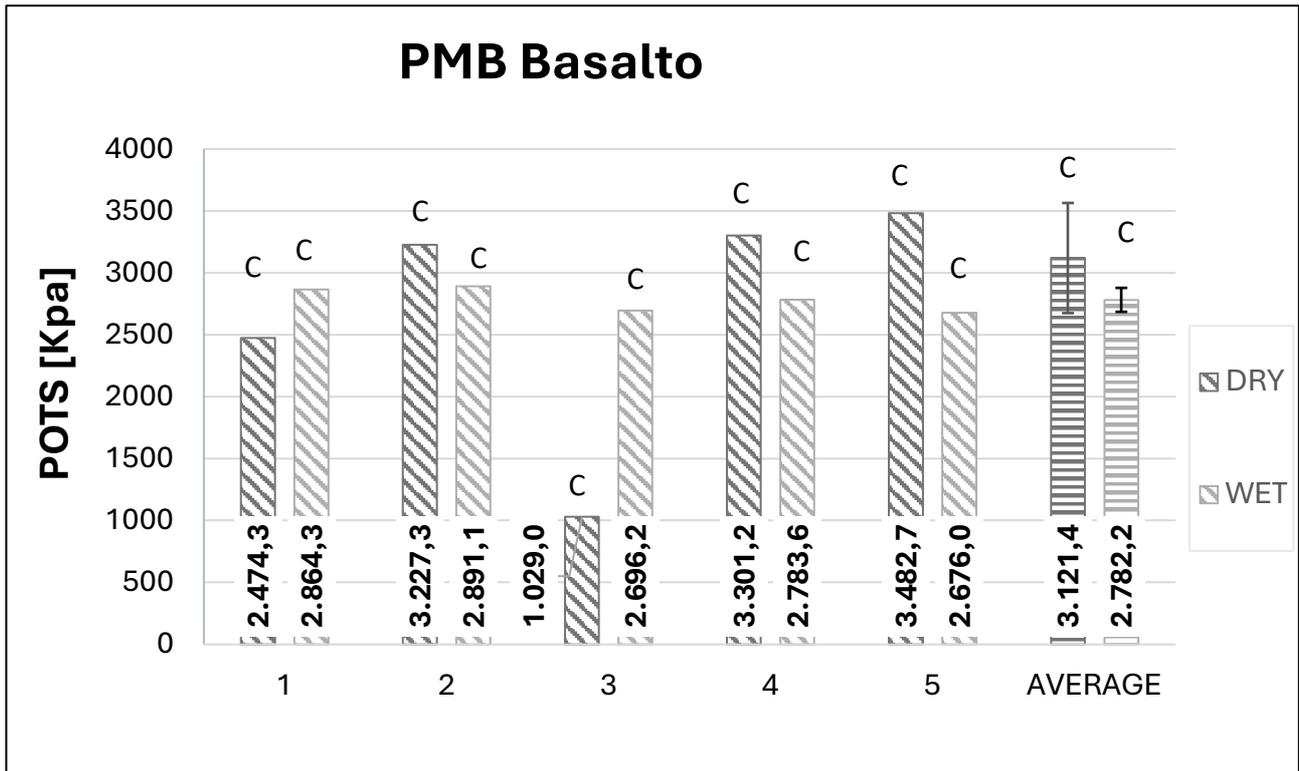


Fig.4.17 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico vergine in condizioni dry e wet

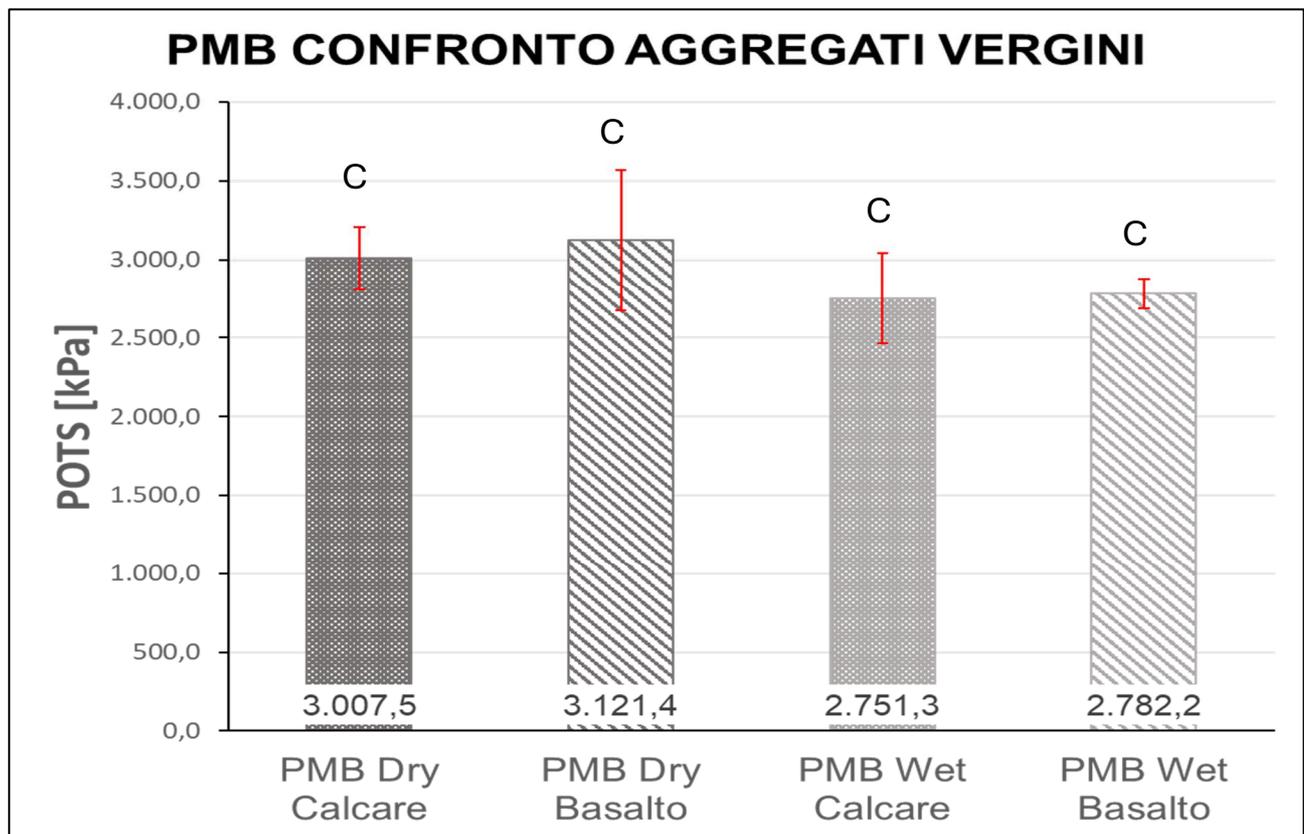


Fig. 4.18 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.18 Rottura coesiva, aggregato calcareo



Fig. 4.19 Rottura coesiva, aggregato basaltico

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare che il bitume di tipo PMB riporta sempre una rottura di tipo coesivo indipendentemente dalla condizione di prova (dry o wet) e dal tipo di substrato (calcareo o basalto). Si può affermare quindi che per il legante PMB la adesione tra bitume e substrato risulta prevalere rispetto alla coesione interna del legante.

### Bitume HPMB\_O

HPMB_O Dry Calcareo				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	21,7	210,7	1.452,5	C
2	21,8	211,6	1.459,2	C
3	21,5	208,7	1.439,0	C
4	21,3	206,8	1.425,6	C
5	25,7	249,7	1.721,4	C
6	23,4	227,2	1.566,8	C
7	22,8	221,4	1.526,4	C
8	26,0	252,6	1.741,6	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.541,6</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>126,4</b>		
<b>CV</b>		<b>8,2</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.38 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni dry

<b>HPMB_O Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	25,6	248,7	1.714,7	C
2	26,8	260,4	1.795,3	C
3	30,3	294,5	2.030,6	C
4	26,1	253,6	1.748,3	C
5	24,5	238,0	1.640,7	C
6	30,8	299,4	2.064,3	C
7	28,4	276,0	1.902,9	C
8	31,7	308,2	2.124,8	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.877,7</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>179,7</b>		
<b>CV</b>		<b>9,6</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.39 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

<b>HPMB_O Wet Calcare</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	24,4	237,0	1.634,0	C
2	22,4	217,5	1.499,6	C
3	26,4	256,5	1.768,5	C
4	24,6	238,9	1.647,5	C
5	25,1	243,8	1.681,1	C
6	23,5	228,2	1.573,5	C
7	26,5	257,5	1.775,2	C
8	27,6	268,2	1.849,1	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.678,5</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>115,0</b>		
<b>CV</b>		<b>6,9</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.40 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni wet

<b>HPMB_O Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	33,1	321,8	2.218,9	C
2	23,8	231,1	1.593,7	C
3	30,6	297,4	2.050,8	C
4	27,7	269,2	1.855,9	C
5*	13,4	129,7	894,5	C
6	19,8	192,1	1.324,8	C
7	18,2	176,5	1.217,2	C
8*	16,8	162,9	1.123,1	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.710,2</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>400,3</b>		
<b>CV</b>		<b>23,4</b>		<b>[%]</b>
* Il quinto e l'ottavo valore, risultati fuori trend, dunque, sono stati esclusi dal calcolo della media e della deviazione standard				

Tab. 4.41 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni wet

<b>HPMB_O CONFRONTO AGGREGATI VERGINI</b>		
<b>AGGREGATI</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DEV. STD.</b>
HPMB_O Dry Calcare	1.541,6	126,4
HPMB_O Dry Basalto	1.877,7	179,7
HPMB_O Wet Calcare	1.678,5	115,0
HPMB_O Wet Basalto	1.710,2	400,3

Tab. 4.42 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

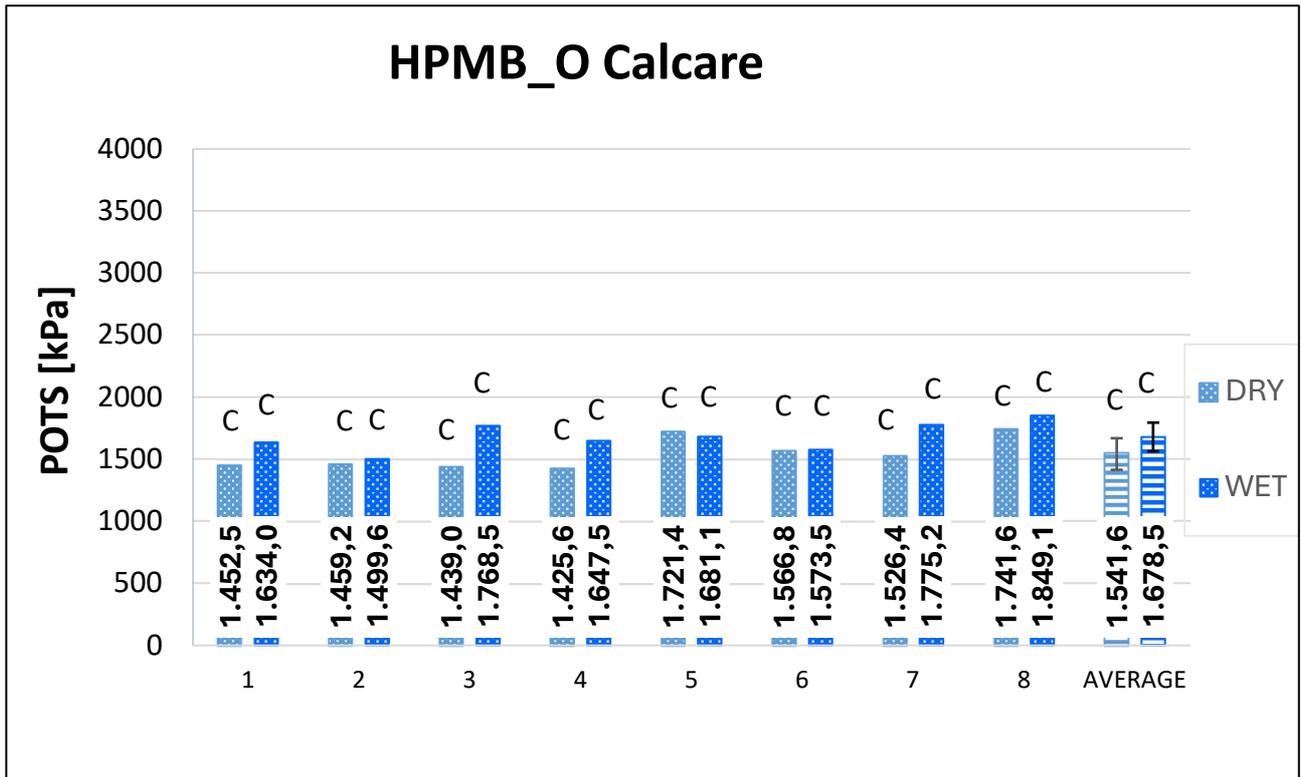


Fig.4.21 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo vergine in condizioni dry e wet

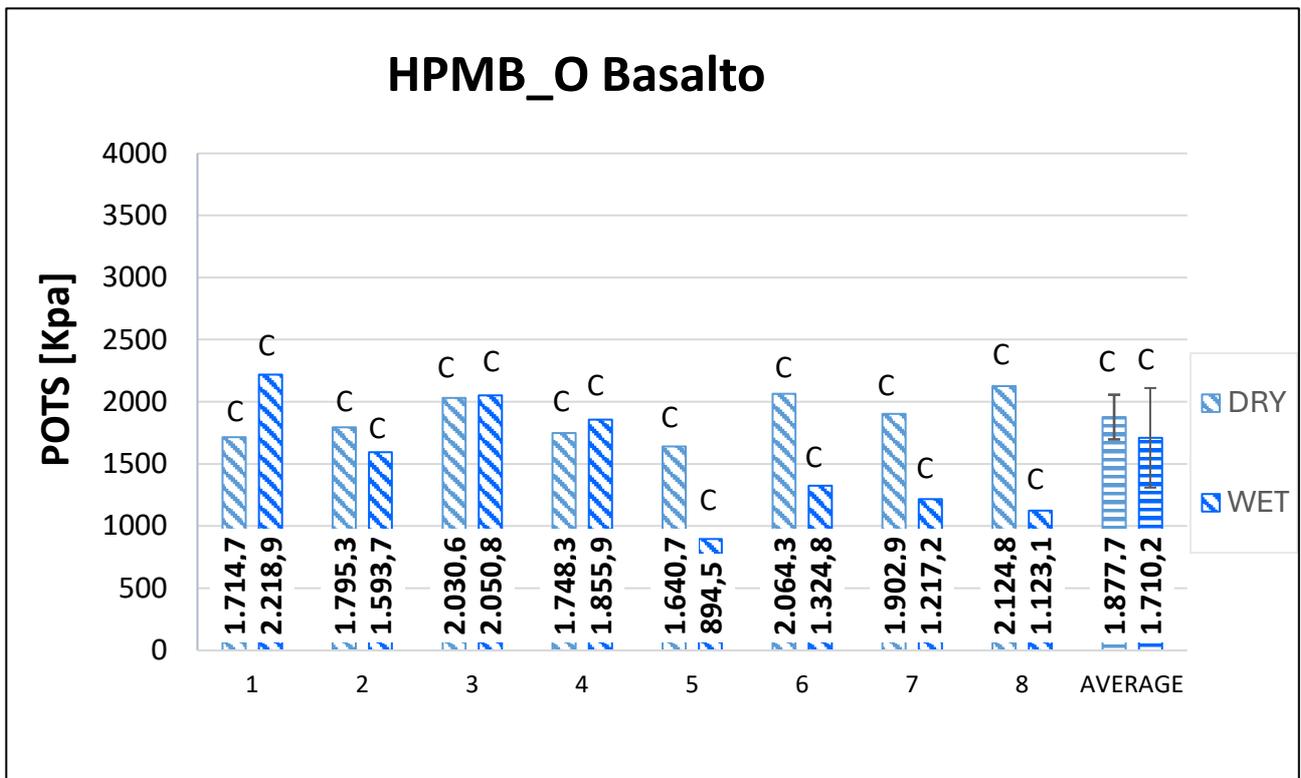


Fig.4.22 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico vergine in condizioni dry e wet

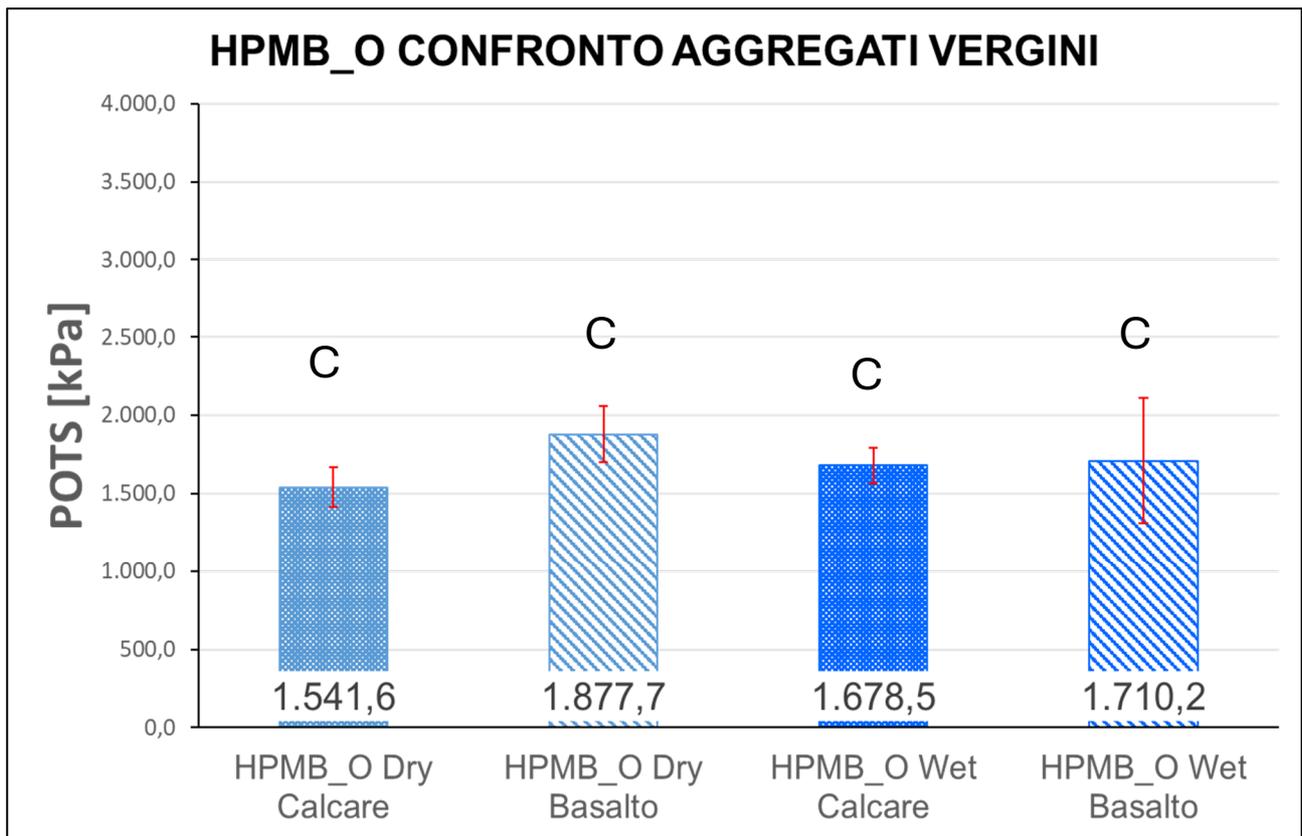


Fig. 4.23 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.24 Rottura coesiva, aggregato calcareo



Fig. 4.25 Rottura coesiva, aggregato basaltico

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare che il bitume di tipo HPMB\_O riporta sempre una rottura di tipo coesivo indipendentemente dalla condizione di prova (dry o wet) e dal tipo di substrato

(calcare o basalto). Si può affermare quindi che anche l'HPMB\_O presenta una buona adesione tra legante e aggregato. Tale adesione risulta essere superiore alla coesione interna del suddetto bitume.

#### 4.4.2. Prove BBS bitume HMPB\_V a diverse temperature su aggregati vergini

Dato le numerose rotture indesiderate delle prove effettuate con l'HPMB\_V, per questo bitume sono state effettuate prove BBS a diverse temperature di incollaggio per cercare di far fronte a questa problematica ed ottenere risultati corretti.

#### Temperatura di incollaggio 170 °C

HPMB_V Dry Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	13,4	129,7	894,5	
2	20,4	198,0	1.365,1	
3	21,1	204,8	1.412,2	
4	23,2	225,3	1.553,3	
5	22,3	216,5	1.492,8	
6	9,8	94,6	652,5	
7	24,7	239,9	1.654,2	
8	16,3	158,0	1.089,5	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.264,3</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>350,8</b>		
<b>CV</b>		<b>27,7</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.43 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni dry

<b>HPMB_V Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	25,5	247,7	1.708,0	
2	25,0	242,8	1.674,3	
3	19,6	190,2	1.311,3	
4	18,4	178,5	1.230,6	
5	13,1	126,8	874,3	
6	14,5	140,5	968,5	
7	18,5	179,5	1.237,4	
8	17,5	169,7	1.170,1	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.271,8</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>296,9</b>		
<b>CV</b>		<b>23,3</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.44 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

<b>HPMB_V Wet Calcareo</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	18,2	176,5	1.217,2	
2	18,6	180,4	1.244,1	
3	17,4	168,7	1.163,4	
4	17,1	165,8	1.143,3	
5	15,1	146,3	1.008,8	
6	17,4	168,7	1.163,4	
7	21,5	208,7	1.439,0	
8	15,0	145,3	1.002,1	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.172,7</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>138,9</b>		
<b>CV</b>		<b>11,8</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.45 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni wet

<b>HPMB_V Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	10,2	98,5	679,4	
2	20,4	198,0	1.365,1	
3	12,7	122,9	847,5	
4	20,3	197,0	1.358,4	
5	18,4	178,5	1.230,6	
6	17,6	170,7	1.176,9	
7	20,3	197,0	1.358,4	
8	20,9	202,9	1.398,7	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.176,9</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>269,8</b>		
<b>CV</b>		<b>22,9</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.46 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo vergine in condizioni wet

<b>HPMB_V CONFRONTO AGGREGATI VERGINI</b>		
<b>AGGREGATI</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DEV. STD.</b>
<b>HPMB_V Dry Calcare</b>	<b>1.264,3</b>	<b>350,8</b>
<b>HPMB_V Dry Basalto</b>	<b>1.271,8</b>	<b>296,9</b>
<b>HPMB_V Wet Calcare</b>	<b>1.172,7</b>	<b>138,9</b>
<b>HPMB_V Wet Basalto</b>	<b>1.176,9</b>	<b>269,8</b>

Tab. 4.47 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

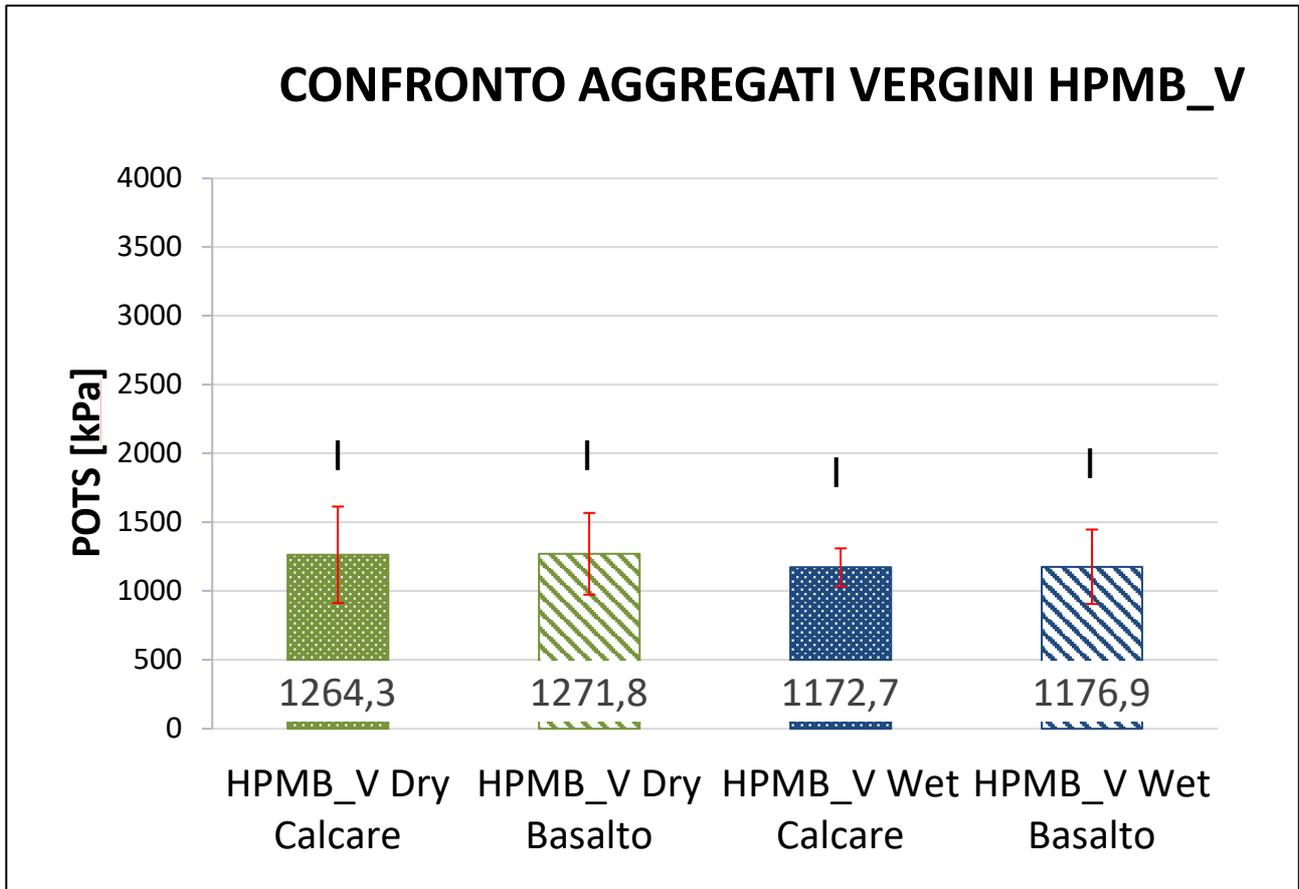


Fig. 4.26 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.27 Rottura indesiderata



Fig. 4.28 Rottura adesiva

**Temperatura di incollaggio 120 °C e 150°C su aggregati di basalto e confronti con le altre prove**

<b>HPMB_V Dry Basalto 120°C</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	15,6	171,2	1.180,1	A
2	15,8	173,4	1.195,3	I
3	15,4	168,9	1.164,9	I
<b>AVERAGE</b>			<b>1.180,1</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>15,2</b>		
<b>CV</b>		<b>1,3</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.48 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

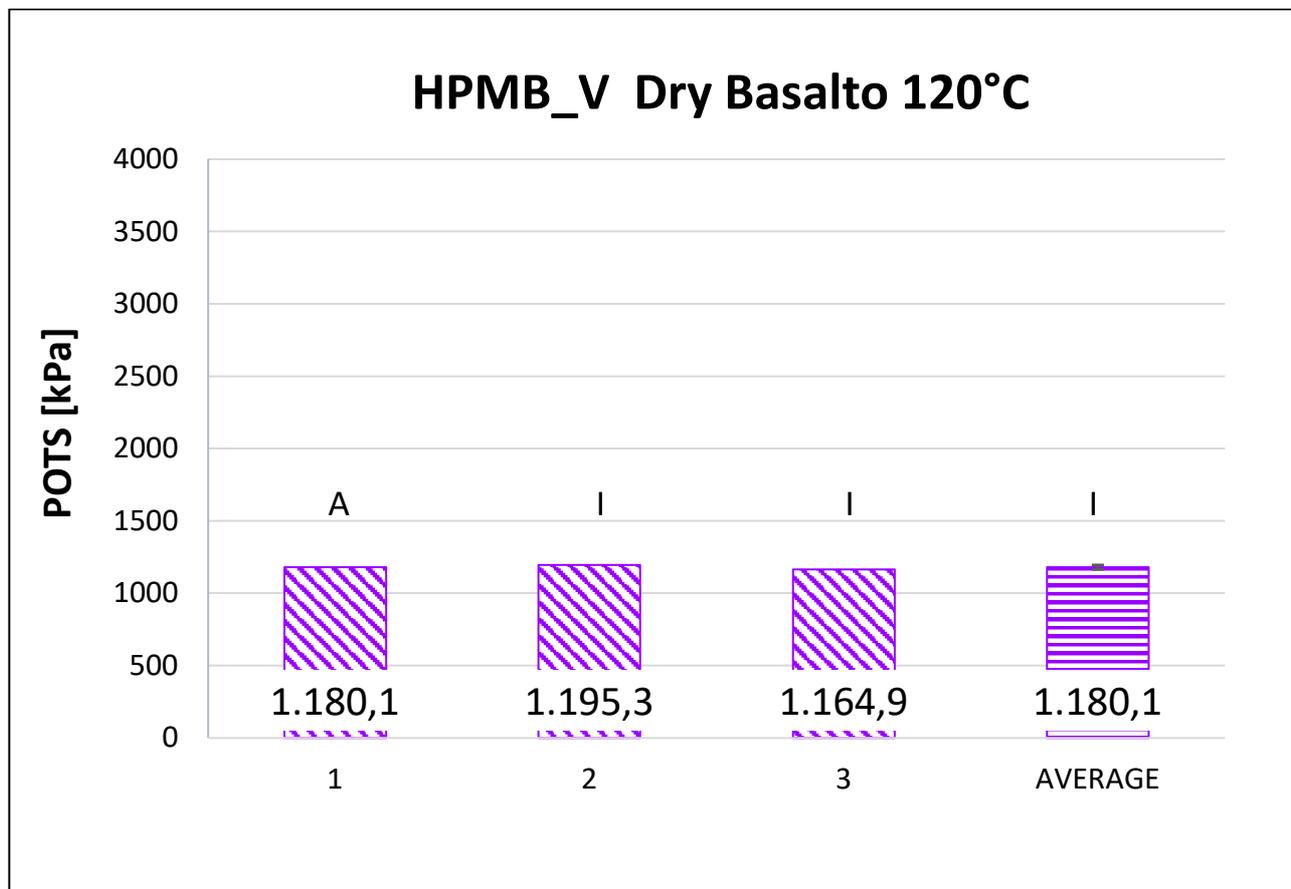


Fig.4.29 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico vergine in condizioni dry



Fig.4.30 Rottura adesiva



Fig.4.31 Rottura indesiderata

HPMB V Dry Basalto 150°C				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	19,9	218,6	1.507,3	
2	21,2	233,0	1.606,3	
3	18,7	205,4	1.416,0	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.509,9</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>95,2</b>		
<b>CV</b>		<b>6,3</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.49 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico vergine in condizioni dry

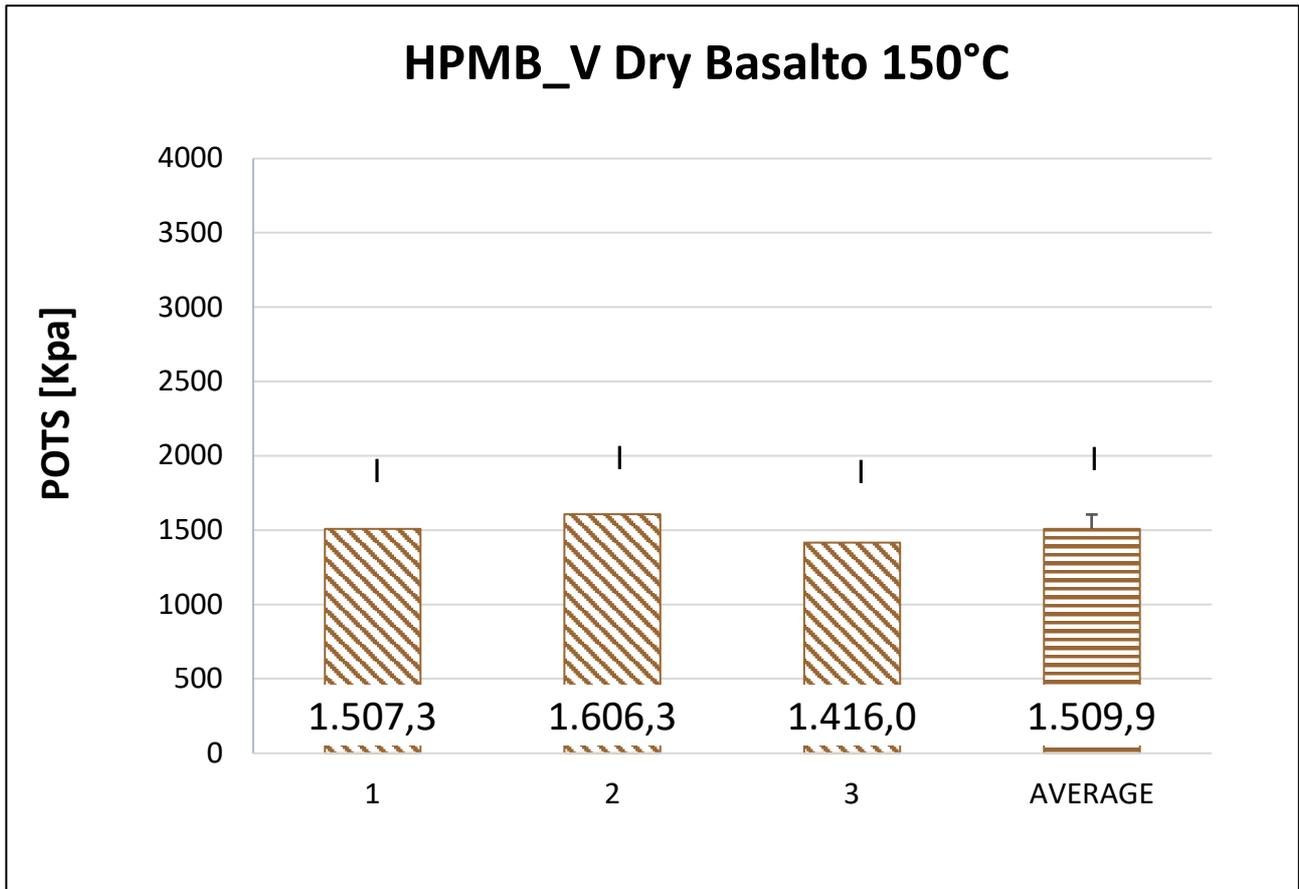


Fig.4.32 Grafico valori POTs ottenuti con aggregato basaltico vergine in condizioni dry



Fig.4.33 Rottura indesiderata



Fig.4.34 Rottura indesiderata

CONFRONTO HPMB_V VERGINE A DIVERSE TEMPERATURE		
AGGREGATO A TEMPERATURE	MEDIA	DEV. STD.
HPMB_V Dry Basalto 120°	1.180,1	15,2
HPMB_V Dry Basalto 150°	1.509,9	95,2
HPMB_V Dry Basalto 170°	1.271,8	296,9
HPMB_V Dry Basalto 180°	1.528,3	73,5

Tab. 4.50 Confronto tra i valori medi ottenuti alle varie temperature

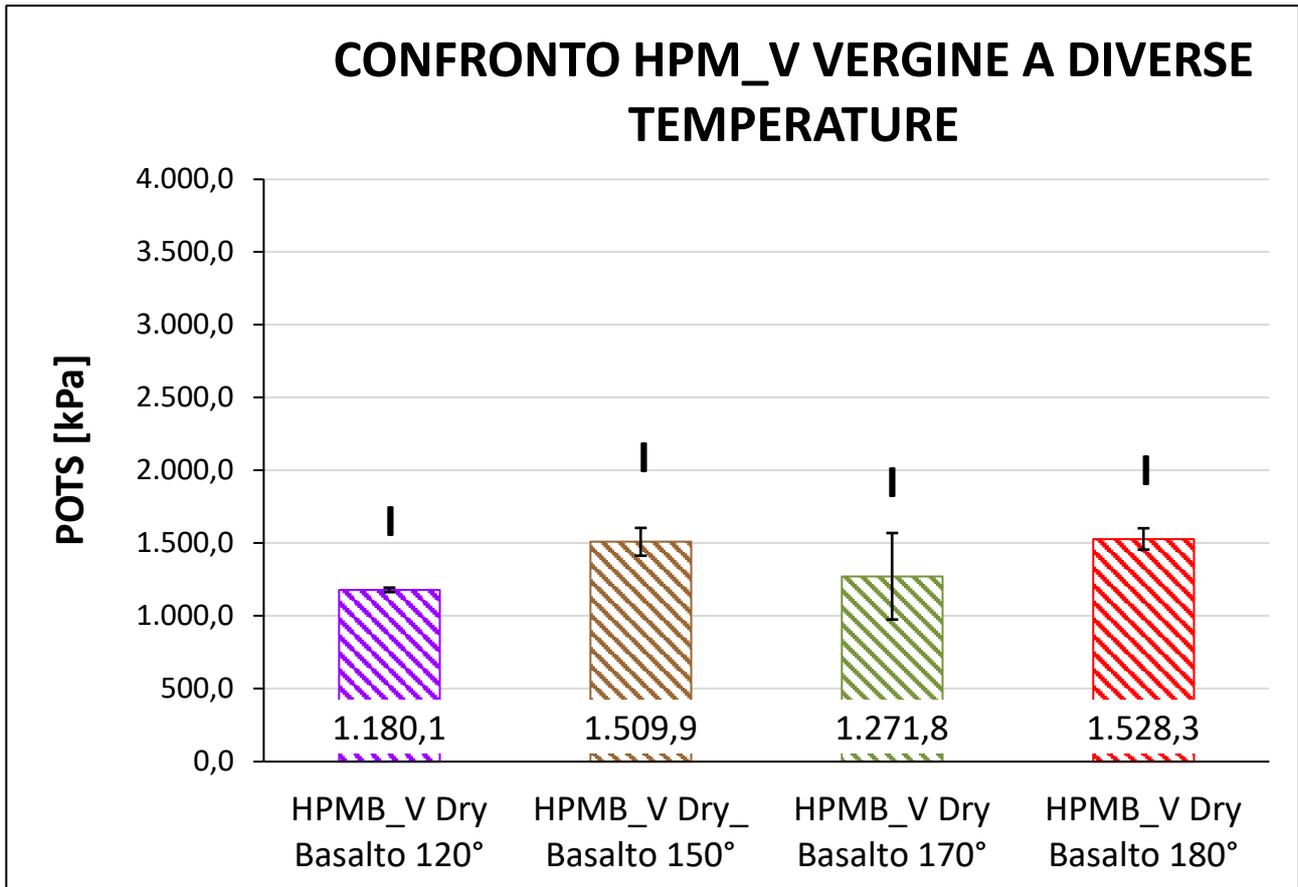


Fig. 4.35 Confronto valori POTTS con aggregato vergine basaltico in condizioni dry a diverse temperature di incollaggio

Dai grafici e dalle foto riportate in precedenza si può osservare che anche a temperature di incollaggio diverse si ottengono comunque rotture indesiderate. Si può concludere quindi che tale problematica risulta propria di questa tipologia di legante e non è possibile valutare le sue proprietà adesive.

#### Confronto prove BBS a temperature di incollaggio 170 °C e 180°C per bitume HPMB\_V

HPMB_V	T. 170°C		T. 180°C	
	MEDIA	DEV. STD.	MEDIA	DEV. STD.
HPMB_V Dry Calcare	1.264,3	350,8	1.454,6	108,6
HPMB_V Dry Basalto	1.271,8	296,9	1.528,3	73,5
HPMB_V Wet Calcare	1.172,7	138,9	1.838,4	112,4
HPMB_V Wet Basalto	1.176,9	269,8	1.714,9	109,9

Tab. 4.51 Confronto tra i valori medi ottenuti alla temperatura di incollaggio 170°C e 180°C

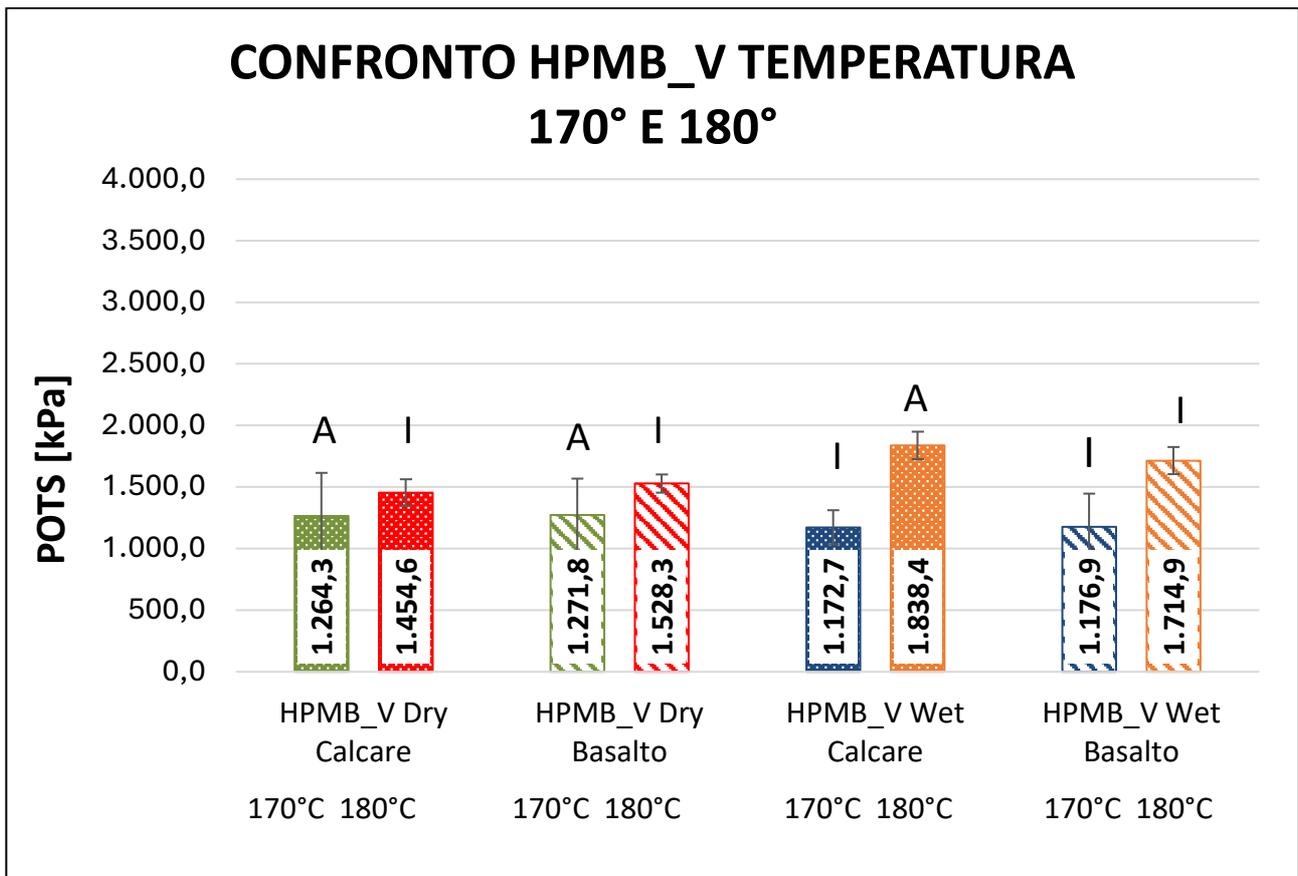


Fig. 4.36 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo e basaltico in condizioni dry e wet a diverse temperature di incollaggio

#### 4.4.3. Confronto prove BBS sui quattro tipi di bitumi

Confronto con aggregati in calcare:

	Tipo di Bitume	media POTS	Dev. St.
<b>calcare</b>	HPMB_O Calcarea Dry	1542	126
	HPMB_O Calcarea Wet	1679	115
	HPMB_V Calcarea Dry	1455	109
	HPMB_V Calcarea Wet	1838	112
	HPMB_A Calcarea Dry	1865	229
	HPMB_A Calcarea Wet	2105	136
	PMB Calcarea Dry	3008	200
	PMB Calcarea Wet	2751	289

Tab. 4.52 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle prove su aggregato calcareo

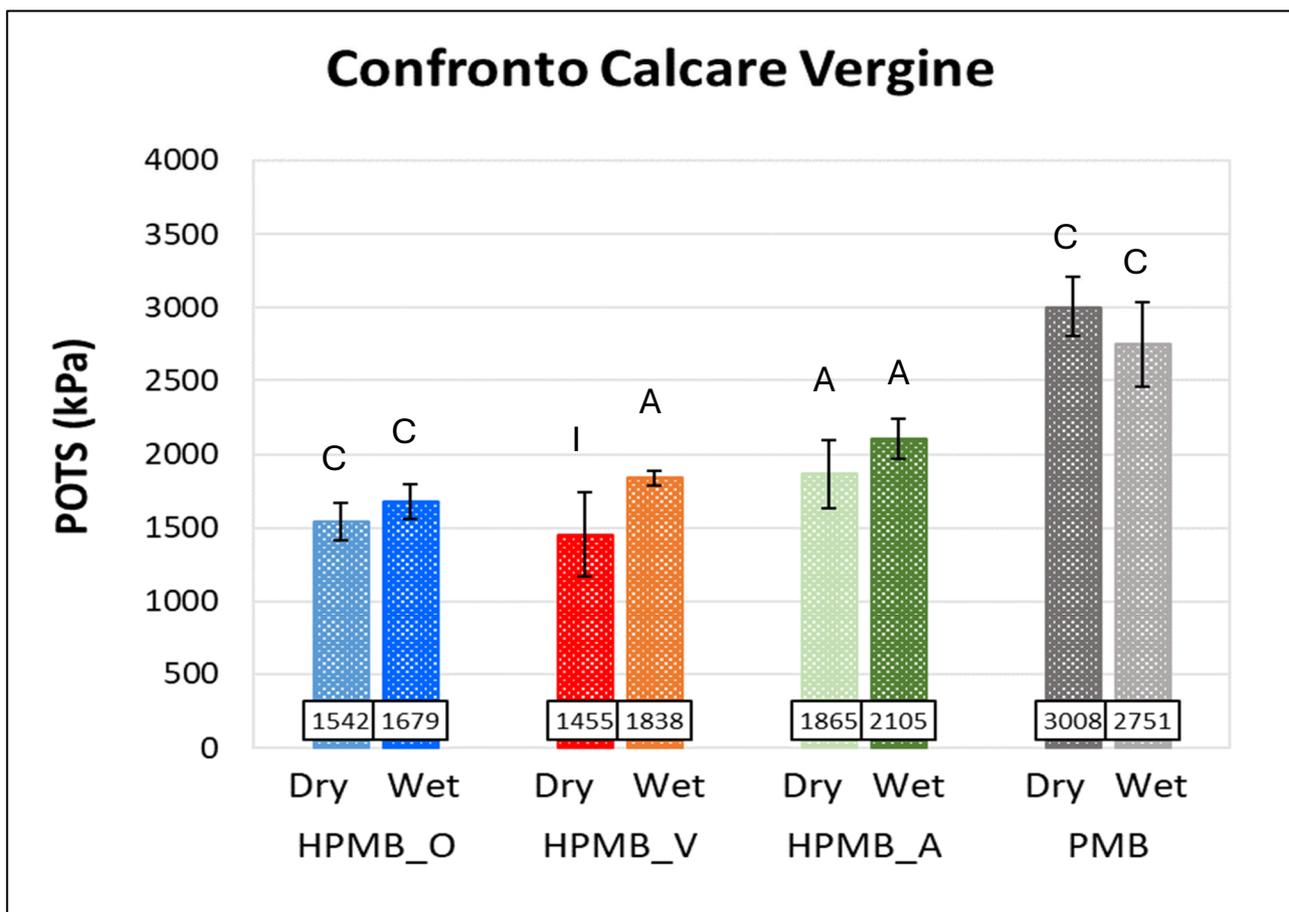


Fig. 4.37 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo in condizioni dry e wet

In questo grafico si riportano tutti i risultati ottenuti utilizzando un substrato calcareo vergine, sia in condizioni dry che wet, per tutti e quattro i bitumi. Si può notare che il PMB ha i valori maggiori di POTS sia per la condizione dry che per la condizione wet rispetto a tutti gli altri bitumi. Inoltre, sia il PMB che l'HPMB\_O sono caratterizzati da rotture di tipo coesivo. Tra i due il migliore risulta proprio il PMB in quanto ha POTS maggiori. Il bitume che presenta meno differenza di POTS tra le due condizioni è l'HPMB\_O e ciò significa che la presenza di acqua influisce poco in termini di coesione/adesione per il sistema bitume-aggregato. L'HPMB\_V riporta una notevole differenza tra il POTS della condizione dry e quello della condizione wet, questo significa che la presenza di acqua incide sui risultati. A supporto di ciò si può notare che per la condizione wet si sono ottenute rotture adesive proprio perché l'adesione risulta più debole, mentre nella condizione dry è sovenuto il problema delle rotture indesiderate.

Confronto con aggregati in basalto:

	Tipo di Bitume	media POTS	Dev. St.
<b>BASALTO</b>	HPMB_O Basalto Dry	1878	180
	HPMB_O Basalto Wet	1710	400
	HPMB_V Basalto Dry	1528	73
	HPMB_V Basalto Wet	1715	110
	HPMB_A Basalto Dry	1970	76
	HPMB_A Basalto Wet	1922	97
	PMB Basalto Dry	3121	445
	PMB Basalto Wet	2782	97

Tab. 4.53 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle prove su aggregato basaltico

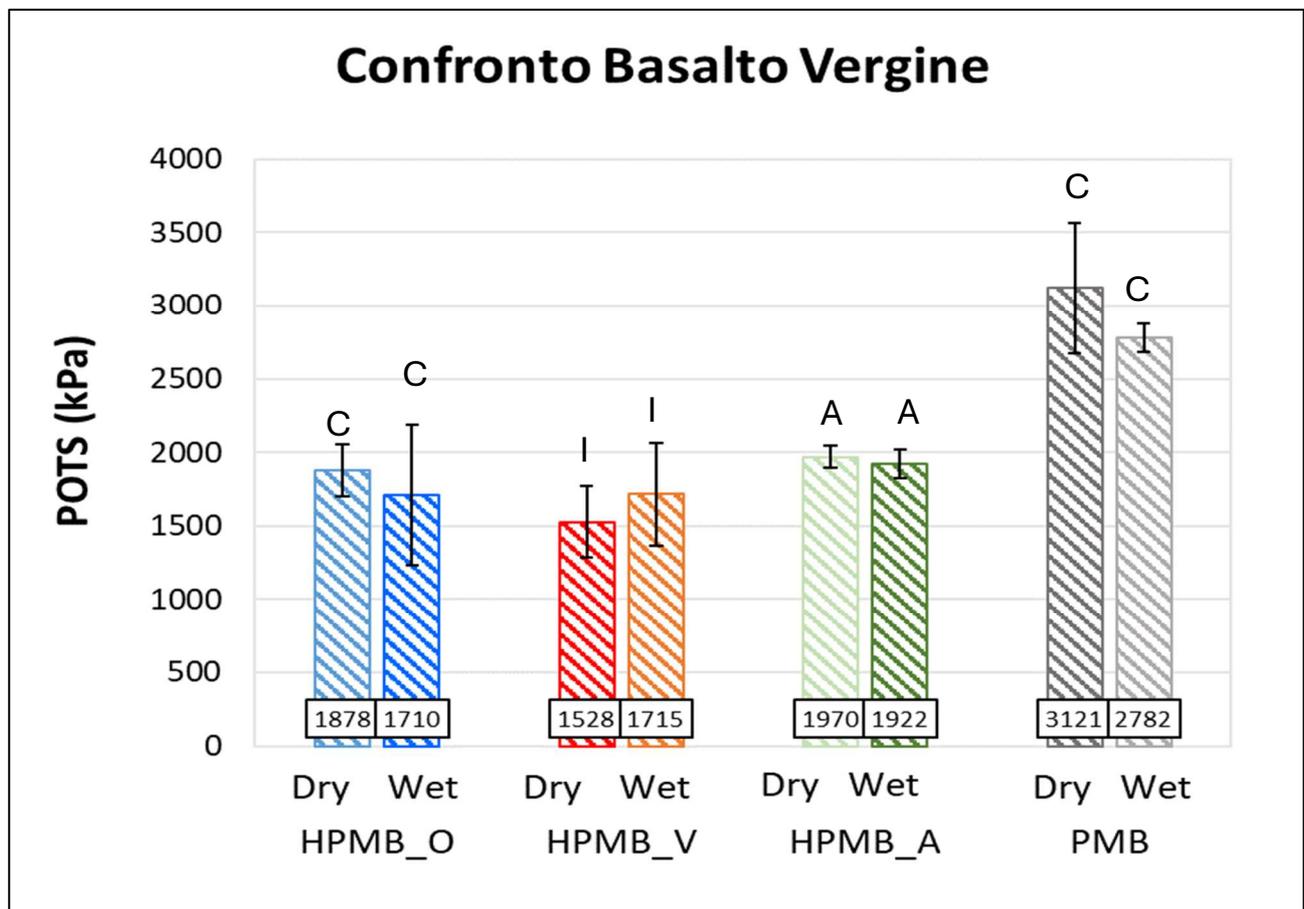


Fig. 4.38 Confronto valori POTS con aggregato vergine calcareo in condizioni dry e wet

In questo grafico si riportano tutti i risultati ottenuti utilizzando un substrato basaltico vergine, sia in condizioni dry che wet, per tutti e quattro i bitumi. Si può notare che, come nel caso di aggregato calcareo, il PMB ha i valori maggiori di POTS sia per la condizione dry che per la condizione wet rispetto

a tutti gli altri bitumi. Il PMB e l'HPMB\_O sono caratterizzati da rotture di tipo coesivo e come in precedenza il migliore tra i due risulta proprio il PMB in quanto ha POTS maggiori. Il bitume che presenta meno differenza di POTS tra le due condizioni( dry e wet) è l'HPMB\_A e ciò significa che il condizionamento in acqua influisce poco in termini di coesione/adesione per il sistema bitume-aggregato. Il PMB riporta una notevole differenza tra il POTS della condizione dry e quello della condizione wet, questo significa che l'immersione in acqua incide sui risultati. Nel caso di aggregati basaltici per l'HPMB\_V si sono ottenute rotture indesiderate in entrambe le condizioni.

#### 4.4.4. Binder Bond Strength (BBS) – Aggregati Riciclati

I valori riportati di seguito sono relativi agli aggregati riciclati

##### Bitume HPMB\_A

HPMB_A Dry Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	27,0	262,3	1.808,8	A
2	32,7	317,9	2.192,0	A
3	27,4	266,2	1.835,7	A
4	28,5	313,5	2.161,8	A
5	27,8	305,8	2.108,6	A
<b>AVERAGE</b>			<b>2.021,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>184,5</b>		
<b>CV</b>		<b>9,1</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.54 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni dry

<b>HPMB_A Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	27,1	298,1	2.055,3	A
2	26,2	254,5	1.755,0	A
3	25,8	250,6	1.728,1	A
4	25,5	247,7	1.708,0	A
5	27,0	262,3	1.808,8	A
<b>AVERAGE</b>	<b>1.811,0</b>			<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>141,7</b>			
<b>CV</b>	<b>7,8</b>			<b>[%]</b>

Tab. 4.55 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni dry

<b>HPMB_A Wet Calcareo</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	31,1	302,3	2.084,4	A
2	29,3	284,8	1.963,4	A
3	26,8	294,8	2.032,5	A
4	29,7	326,8	2.253,2	A
5	28,1	309,1	2.131,4	A
<b>AVERAGE</b>	<b>2.093,0</b>			<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>109,2</b>			
<b>CV</b>	<b>5,2</b>			<b>[%]</b>

Tab. 4.56 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni wet

<b>HPMB_A Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	27,1	263,3	1.815,5	A
2	26,9	295,9	2.040,1	A
3	25,8	250,6	1.728,1	A
4	25,3	245,8	1.694,5	A
5	26,2	254,5	1.755,0	A
<b>AVERAGE</b>	<b>1.806,6</b>			<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>137,8</b>			
<b>CV</b>	<b>7,6</b>			<b>[%]</b>

Tab. 4.57 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni wet

HPMB_A CONFRONTO AGGREGATI RICICLATI		
AGGREGATI	MEDIA	DEV. STD.
HPMB_A Dry Calcare	2.021,4	184,5
HPMB_A Dry Basalto	1.811,0	141,7
HPMB_A Wet Calcare	2.093,0	109,2
HPMB_A Wet Basalto	1.806,6	137,8

Tab. 4.58 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

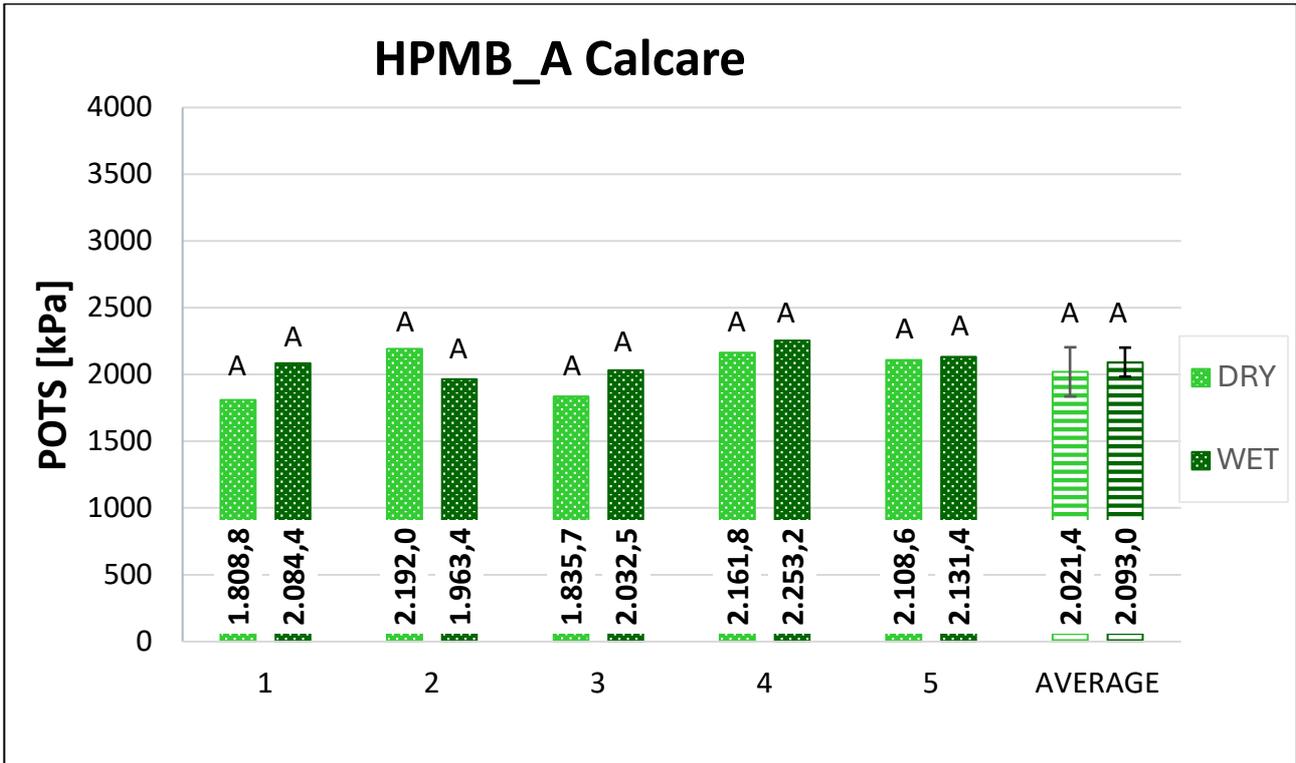


Fig.4.39 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo riciclato in condizioni dry e wet

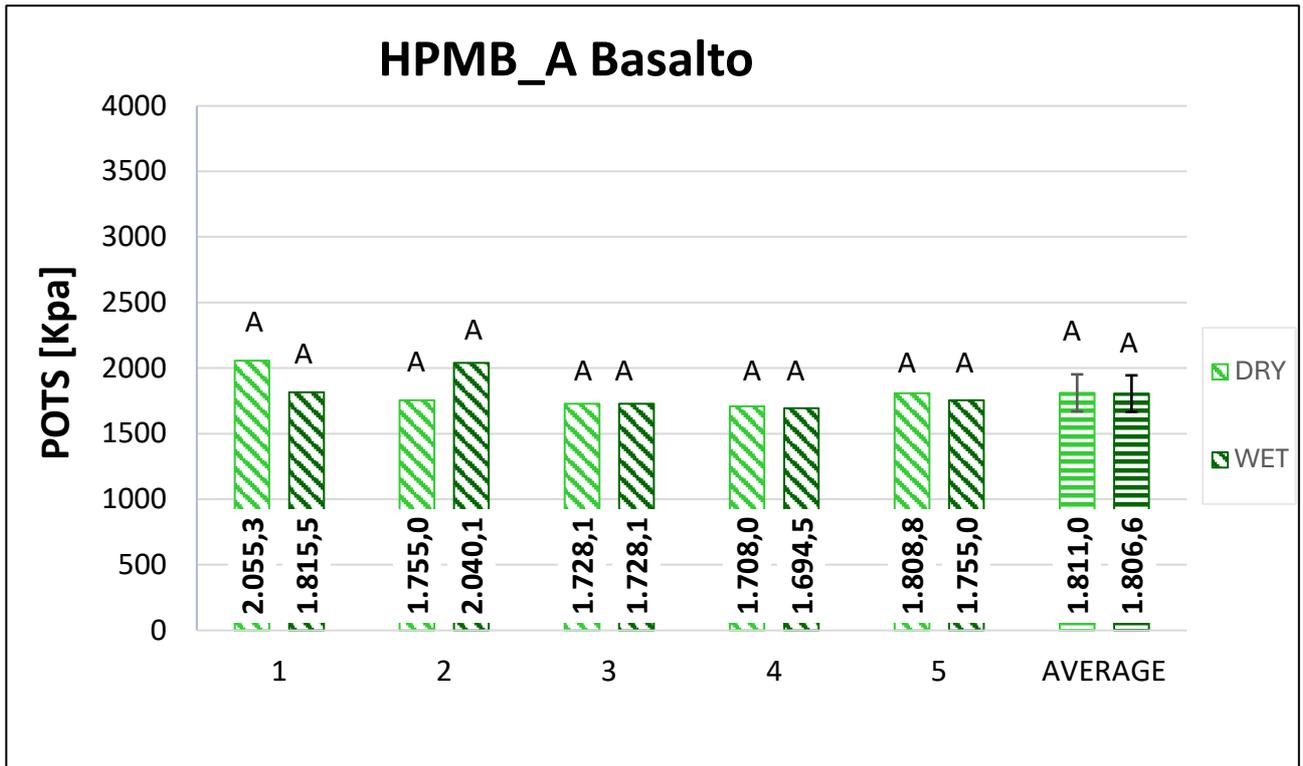


Fig.4.40 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico riciclato in condizioni dry e wet

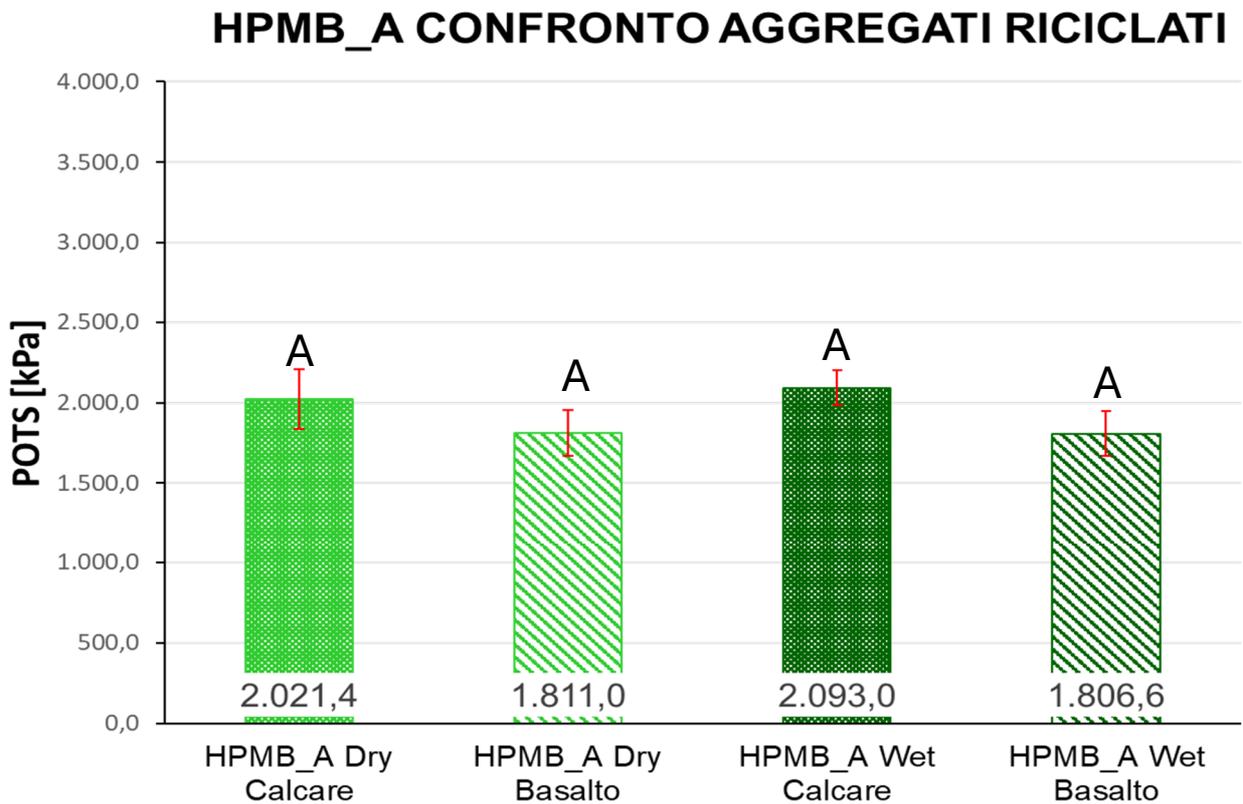


Fig. 4.41 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.42 Rottura adesiva,  
aggregato basaltico



Fig. 4.43 Rottura adesiva  
aggregato calcareo

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare che il bitume di tipo HPMB\_A riporta sempre una rottura di tipo adesivo indipendentemente dalla condizione di prova (dry o wet) e dal tipo di substrato (calcareo o basalto). Si può affermare quindi che per il legante HPMB\_A la coesione interna prevale sulle proprietà adesive tra legante e aggregato.

### Bitume HPMB\_V

HPMB_V Dry Calcareo				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	21,7	210,7	1.452,5	I
2	20,6	199,9	1.378,5	I
3	19,8	217,5	1.499,7	I
4	19,5	189,2	1.304,6	I
5	18,7	205,4	1.416,0	I
<b>AVERAGE</b>			<b>1.410,3</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>74,1</b>		
<b>CV</b>		<b>5,3</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.59 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni dry

<b>HPMB_V Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	19,9	193,1	1.331,5	I
2	21,2	205,8	1.418,9	I
3	18,3	177,5	1.223,9	I
4	19,1	209,8	1.446,4	I
5	19,3	187,3	1.291,1	I
<b>AVERAGE</b>			<b>1.342,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>91,5</b>			
<b>CV</b>	<b>6,8</b>		<b>[%]</b>	

Tab. 4.60 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni dry

<b>HPMB_V Wet Calcareo</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	18,7	205,4	1.416,0	A
2	17,6	170,7	1.176,9	A
3	19,2	186,3	1.284,4	C
4	19,3	187,3	1.291,1	I
5	18,9	183,4	1.264,3	M
<b>AVERAGE</b>			<b>1.286,5</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>85,6</b>			
<b>CV</b>	<b>6,7</b>		<b>[%]</b>	

Tab. 4.61 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni wet

<b>HPMB_V Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	18,6	180,4	1.244,1	A
2	17,3	167,8	1.156,7	A
3	16,9	185,5	1.279,0	A
4	17,1	187,7	1.294,2	A
5	16,5	160,0	1.102,9	A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.215,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>82,4</b>			
<b>CV</b>	<b>6,8</b>		<b>[%]</b>	

Tab. 4.62 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni wet

HPMB_V CONFRONTO AGGREGATI RICICLATI		
AGGREGATI	MEDIA	DEV. STD.
HPMB_V Dry Calcare	1.410,3	74,1
HPMB_V Dry Basalto	1.342,4	91,5
HPMB_V Wet Calcare	1.286,5	85,6
HPMB_V Wet Basalto	1.215,4	82,4

Tab. 4.63 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

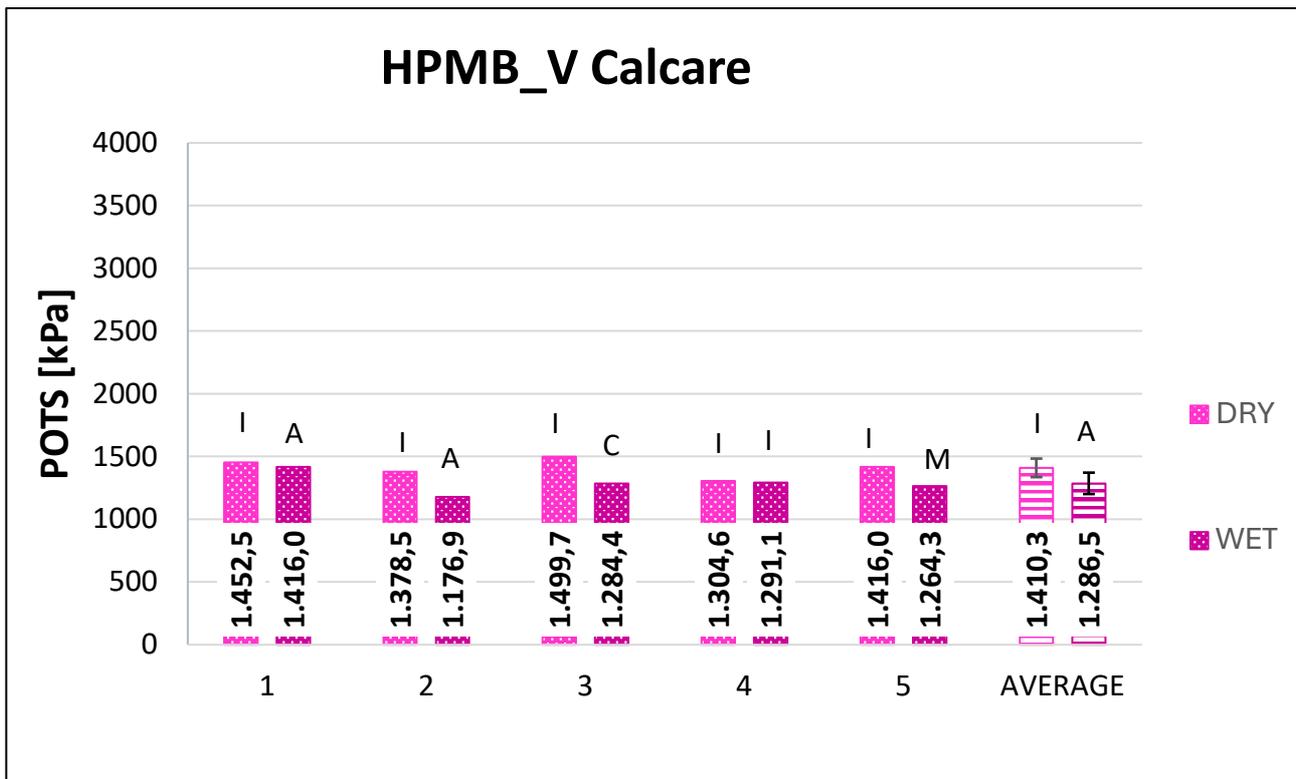


Fig.4.44 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo riciclato in condizioni dry e wet

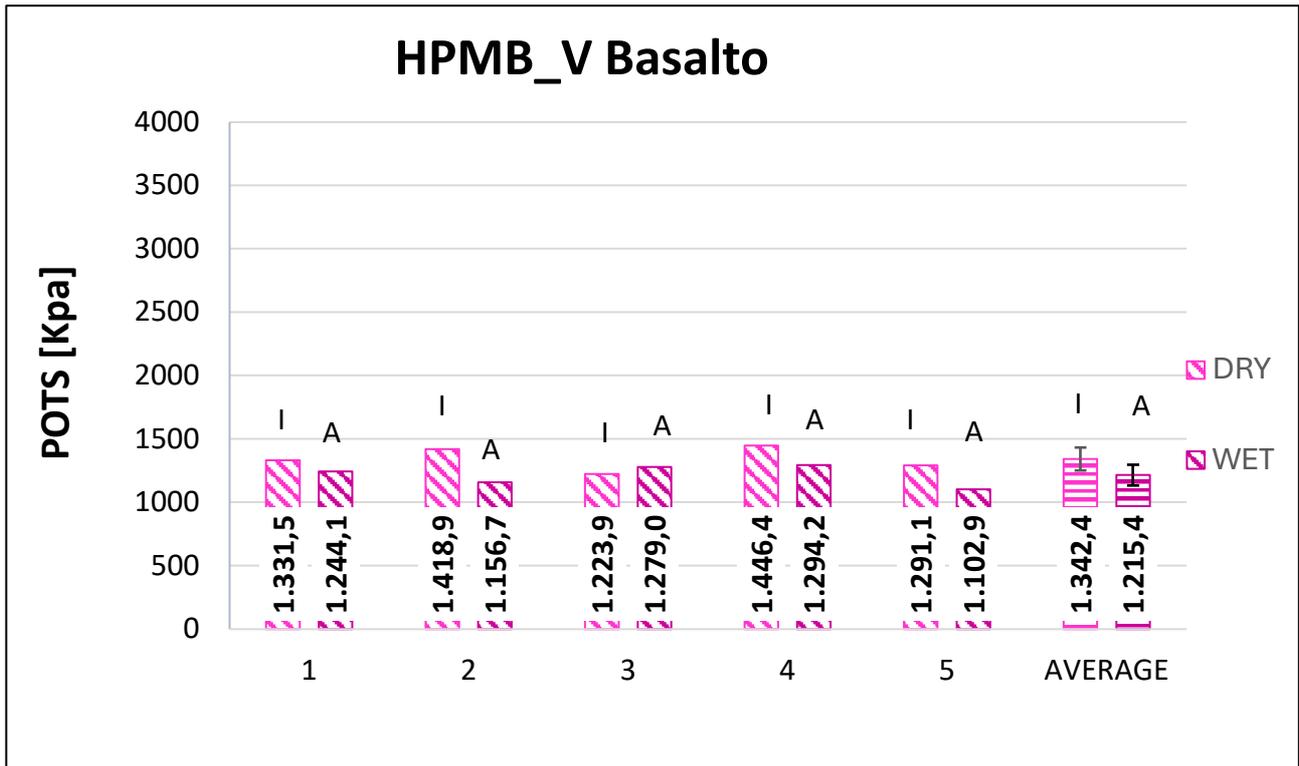


Fig.4.45 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico riciclato in condizioni dry e wet

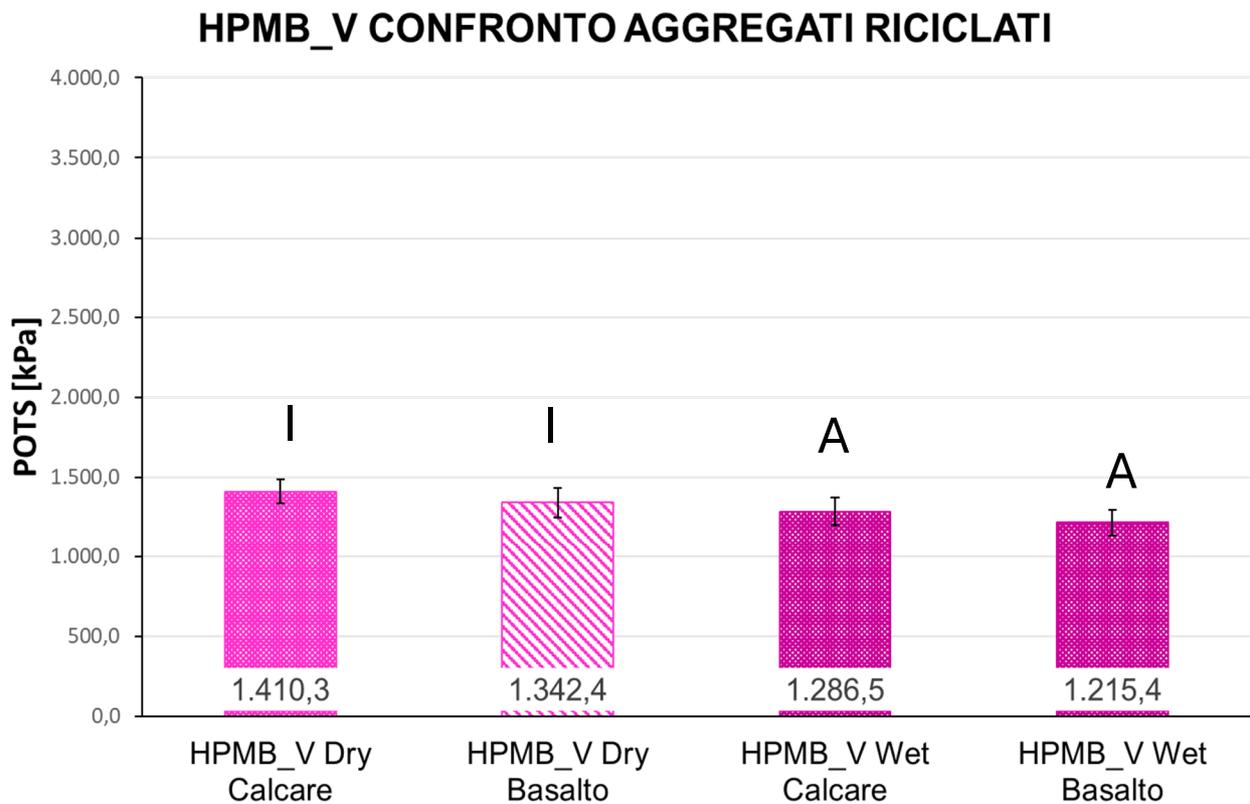


Fig. 4.46 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.47 Rottura indesiderata



Fig. 4.48 Rottura adesiva

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare, come nel caso degli aggregati vergini, la problematicità di questo bitume. Per la condizione dry, infatti, si sono verificate numerose rotture indesiderate sia nel caso di aggregato calcareo che basaltico. Ciò non ha permesso di valutare le proprietà adesive del legante HPMB\_V. Per la condizione wet, invece, si sono ottenute rotture adesive sia nel caso di substrato calcareo che basaltico.

## Bitume PMB

PMB Dry Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	32,5	316,0	2.178,5	C
2	36,8	357,9	2.467,6	C
3	30,5	296,5	2.044,1	C
4	29,5	324,6	2.237,9	C
5	32,6	358,8	2.473,9	C
<b>AVERAGE</b>			<b>2.280,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>187,4</b>		
<b>CV</b>		<b>8,2</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.64 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni dry

<b>PMB Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	24,6	238,9	1.647,5	C
2	27,1	263,3	1.815,5	C
3	26,7	259,4	1.788,6	C
4	33,2	365,4	2.519,5	C
5	30,6	336,7	2.321,6	C
<b>AVERAGE</b>	<b>2.018,6</b>			<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>379,0</b>			
<b>CV</b>	<b>18,8</b>			<b>[%]</b>

Tab. 4.65 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni dry

<b>PMB Wet Calcare</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	44,8	435,9	3.005,4	C
2	41,3	454,8	3.136,0	C
3	46,9	516,6	3.562,2	C
4	46,2	449,6	3.099,5	C
5	45,7	444,7	3.065,9	C
<b>AVERAGE</b>	<b>3.173,8</b>			<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>222,3</b>			
<b>CV</b>	<b>7,0</b>			<b>[%]</b>

Tab. 4.66 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni wet

<b>PMB Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	31,6	307,2	2.118,0	C
2	35,1	341,3	2.353,3	C
3	35,6	346,2	2.386,9	C
4	34,5	335,5	2.313,0	C
5	38,0	369,6	2.548,3	C
<b>AVERAGE</b>	<b>2.343,9</b>			<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>	<b>154,7</b>			
<b>CV</b>	<b>6,6</b>			<b>[%]</b>

Tab. 4.67 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni wet

PMB CONFRONTO AGGREGATI RICICLATI		
AGGREGATI	MEDIA	DEV. STD.
PMB Dry Calcare	2.280,4	187,4
PMB Dry Basalto	2.018,6	379,0
PMB Wet Calcare	3.173,8	222,3
PMB Wet Basalto	2.343,9	154,7

Tab. 4.68 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

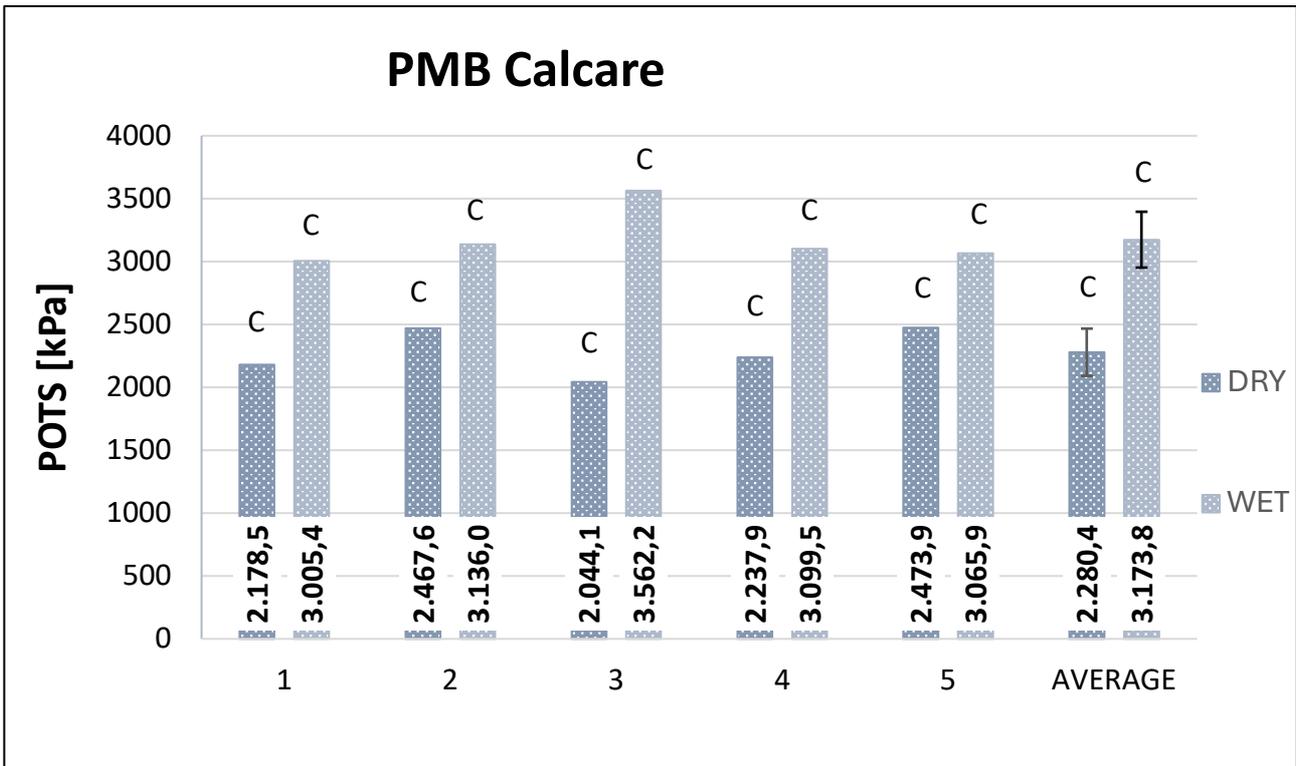


Fig.4.49 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo riciclato in condizioni dry e wet

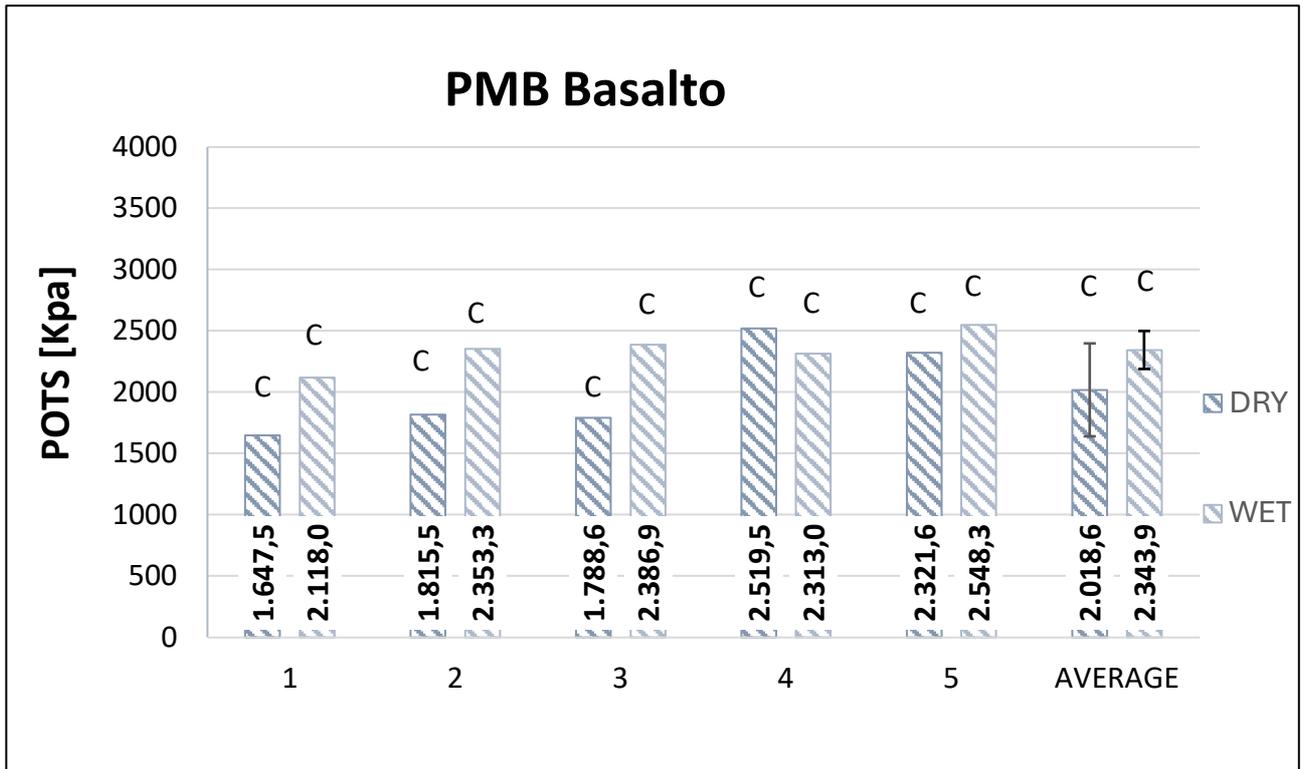


Fig.4.50 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico riciclato in condizioni dry e wet

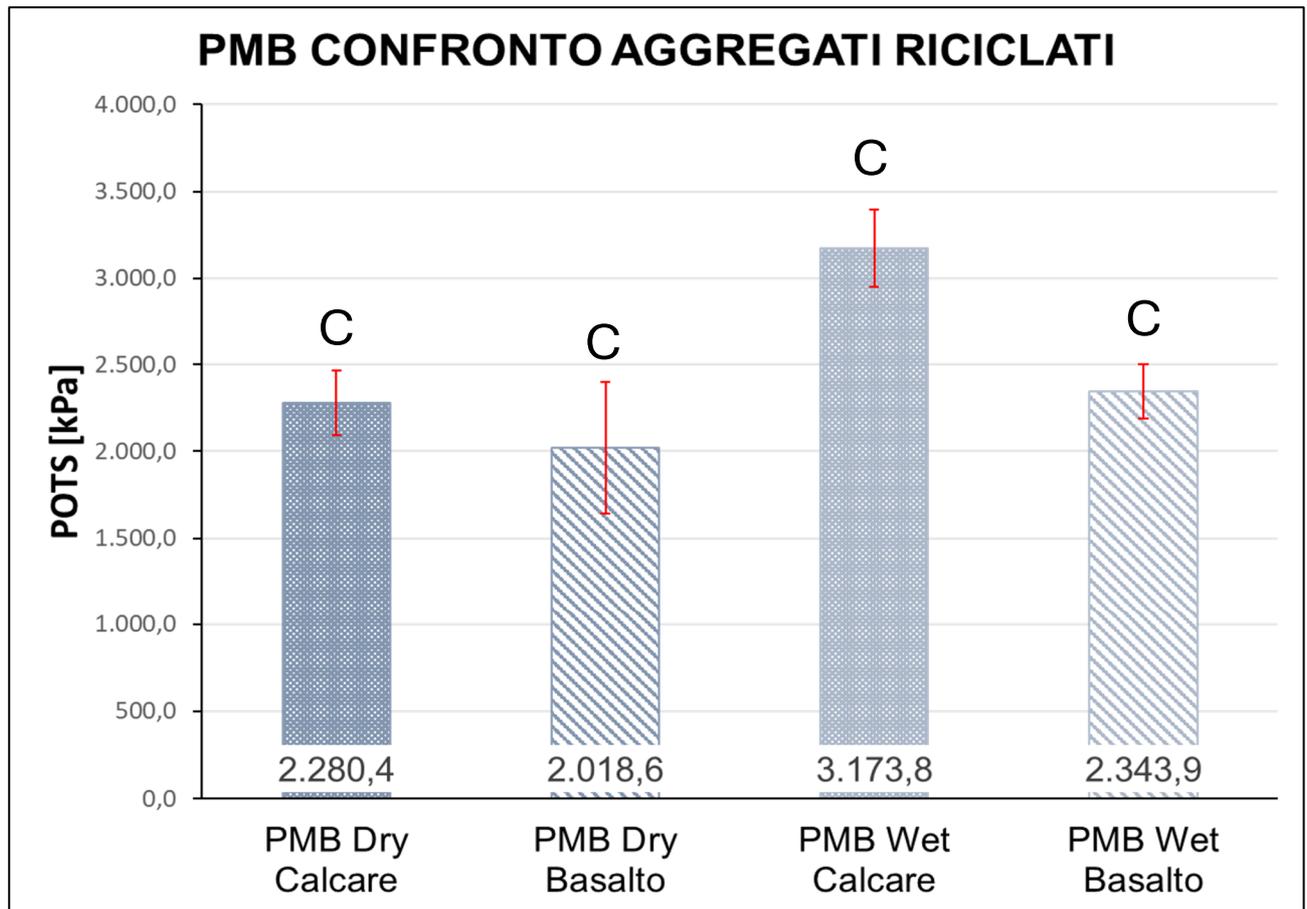


Fig. 4.51 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.52 Rottura coesiva, aggregato calcareo



Fig. 4.53 Rottura coesiva, aggregato basaltico

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare che il bitume di tipo PMB riporta sempre una rottura di tipo coesivo indipendentemente dalla condizione di prova (dry o wet) e dal tipo di substrato (calcareo o basalto). Si può affermare quindi che per il legante PMB la adesione tra bitume e substrato risulta prevalere rispetto alla coesione interna del legante.

### Bitume HPMB\_O

HPMB_O Dry Calcareo				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	22,1	214,6	1.479,4	C
2	20,2	196,0	1.351,7	C
3	28,0	272,1	1.876,0	C
4	24,0	233,1	1.607,1	C
5	24,4	237,0	1.634,0	C
6	23,5	228,2	1.573,5	C
7	22,5	218,5	1.506,3	C
8	22,8	221,4	1.526,4	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.569,3</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>151,6</b>		
<b>CV</b>		<b>9,7</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.69 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni dry

<b>HPMB_O Dry Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	19,1	185,3	1.277,7	C
2	17,8	172,6	1.190,3	C/A
3	20,8	201,9	1.392,0	C/A
4	19,2	186,3	1.284,4	C/A
5	22,1	214,6	1.479,4	C/A
6	20,7	200,9	1.385,3	C/A
7	22,9	222,4	1.533,2	C/A
8	22,2	215,5	1.486,1	C/A
<b>AVERAGE</b>			<b>1.378,5</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>119,7</b>		
<b>CV</b>		<b>8,7</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.70 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni dry

<b>HPMB_O Wet Calcare</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	32,0	311,1	2.144,9	C
2	29,0	281,8	1.943,2	C
3	28,7	278,9	1.923,1	C/A
4	32,8	318,9	2.198,7	C/A
5	26,4	256,5	1.768,5	C/A
6	25,6	248,7	1.714,7	C/A
7	21,6	209,7	1.445,8	C
8	23,2	225,3	1.553,3	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.836,5</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>266,6</b>		
<b>CV</b>		<b>14,5</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.71 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni wet

<b>HPMB_O Wet Basalto</b>				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	20,4	198,0	1.365,1	C
2	22,0	213,6	1.472,7	C
3	20,5	199,0	1.371,8	C
4	18,9	183,4	1.264,3	C
5	21,7	210,7	1.452,5	C
6	23,6	229,2	1.580,2	C
7	20,7	200,9	1.385,3	C
8	21,1	204,8	1.412,2	C
<b>AVERAGE</b>			<b>1.413,0</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>92,6</b>		
<b>CV</b>		<b>6,6</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.72 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni wet

<b>HPMB_O CONFRONTO AGGREGATI RICICLATI</b>		
<b>AGGREGATI</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DEV. STD.</b>
HPMB_O Dry Calcare	1.569,3	151,6
HPMB_O Dry Basalto	1.378,5	119,7
HPMB_O Wet Calcare	1.836,5	266,6
HPMB_O Wet Basalto	1.413,0	92,6

Tab. 4.73 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle varie condizioni di prova

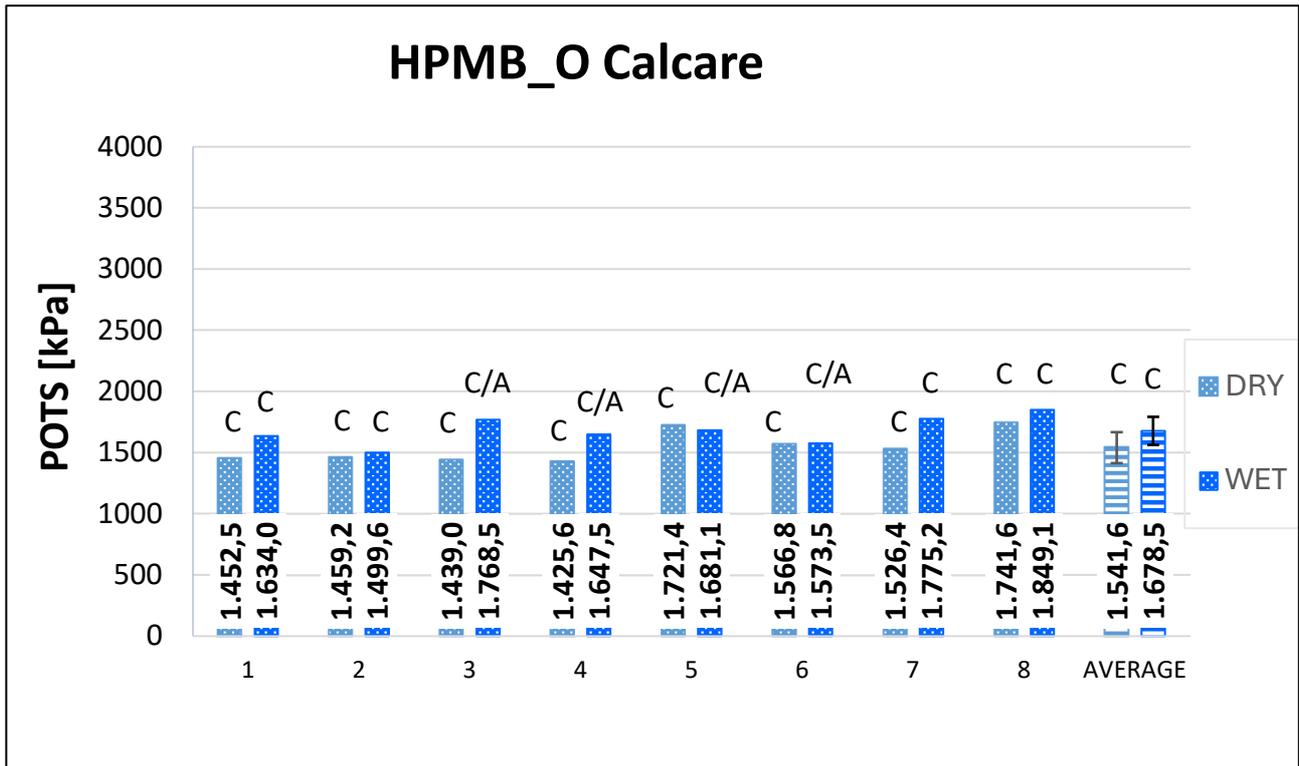


Fig.4.54 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato calcareo riciclato in condizioni dry e wet

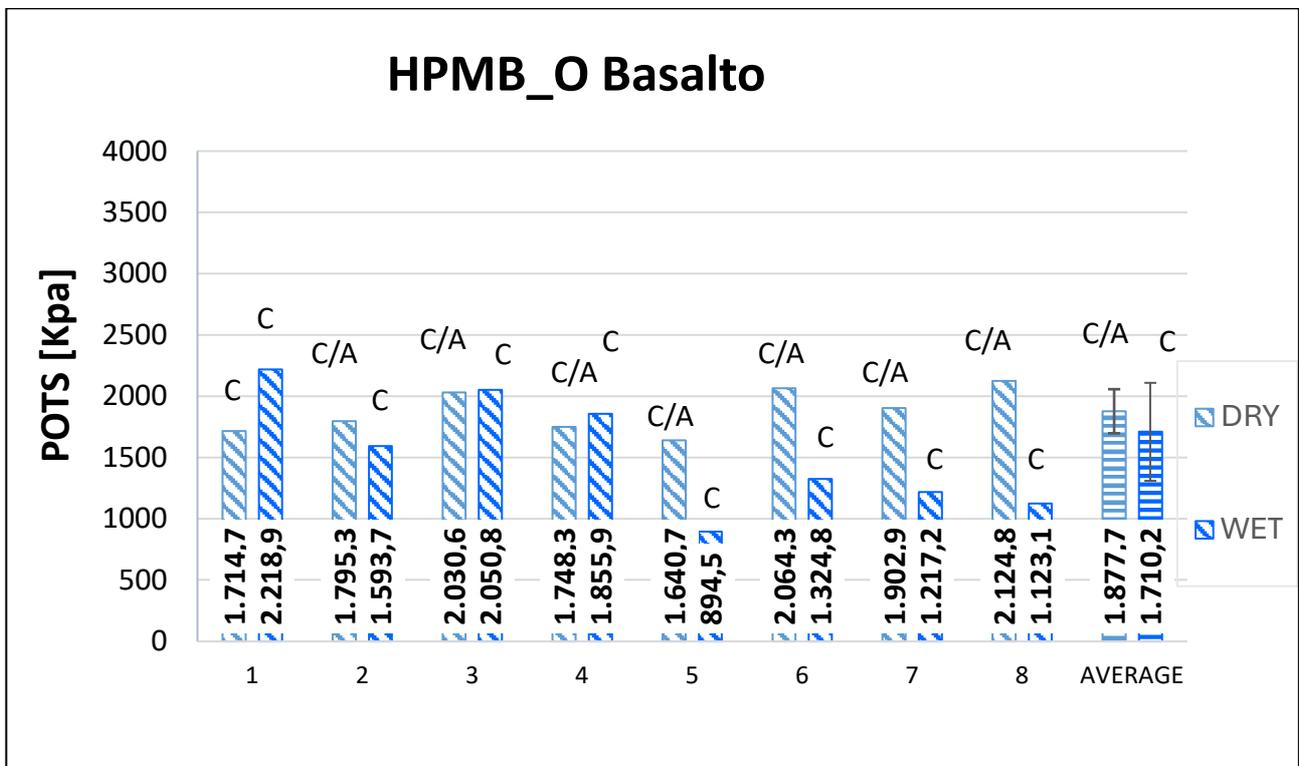


Fig.4.55 Grafico valori POTS ottenuti con aggregato basaltico riciclato in condizioni dry e wet

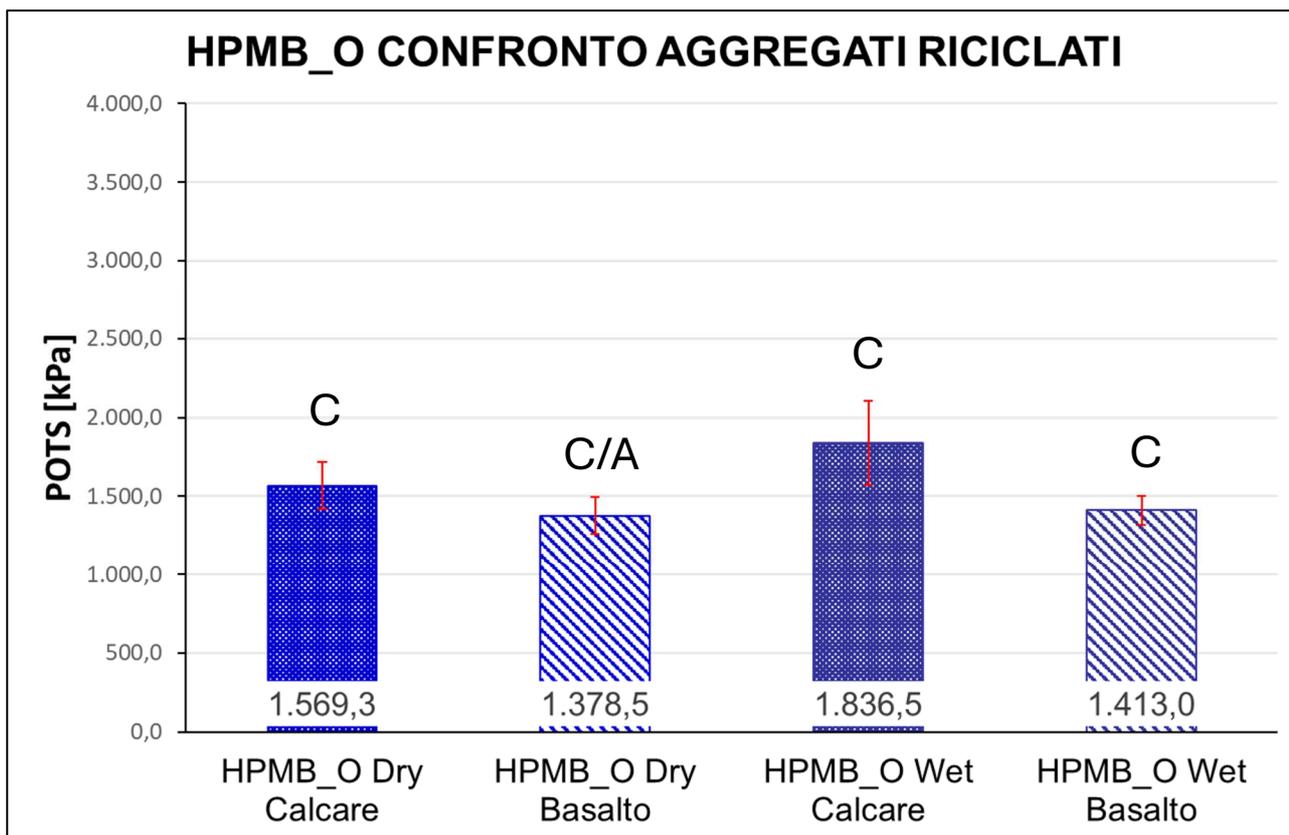


Fig. 4.56 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo e basaltico sia in condizioni dry che wet



Fig. 4.57 Rottura coesiva



Fig. 4.58 Rottura mista

Dal grafico di confronto e dall'analisi visiva delle immagini riportate si può notare che il bitume di tipo HPMB\_O riporta rotture di tipo coesivo nel caso di condizione dry con substrato calcareo e nel caso di condizione wet sia con aggregato calcareo che basaltico. Per la condizione dry con substrato basaltico si ha invece una rottura mista.

#### 4.4.5. Prove BBS bitume HMPB\_V a diverse temperature su aggregati riciclati

Come per gli aggregati vergini anche nel caso degli aggregati riciclati per il bitume di tipo HPMB\_V sono state effettuate prove BBS a diverse temperature di incollaggio per cercare di ottenere risultati corretti anziché rotture indesiderate.

Dai grafici e dalle foto riportate di seguito si può osservare che anche a temperature di incollaggio diverse si ottengono sempre rotture indesiderate. Si può concludere quindi che tale problematica risulta propria di questa tipologia di legante e non è possibile valutare le sue proprietà adesive.

#### Temperatura di incollaggio 170 °C

HPMB_V Wet Calcare				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	18,0	174,6	1.203,8	
2	15,3	148,3	1.022,2	
3	14,8	143,4	988,6	
4	13,2	127,8	881,1	
5*	2,5	23,5	161,7	
6	22,1	214,6	1.479,4	
7	16,5	160,0	1.102,9	
8	17,0	164,8	1.136,5	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.116,4</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>191,7</b>		
<b>CV</b>		<b>17,2</b>		<b>[%]</b>
* Il quinto valore, risultati fuori trend, è stato escluso dal calcolo della media e della deviazione standard				

Tab. 4.74 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato calcareo riciclato in condizioni wet

HPMB_V Wet Basalto				
Specimen	BP	POTS	POTS	Tipo Rottura
	[psig]	[psi]	[kPa]	[A,C,M]
1	16,6	160,9	1.109,6	
2	17,4	168,7	1.163,4	
3	16,3	158,0	1.089,5	
4	13,4	129,7	894,5	
5	20,6	199,9	1.378,5	
6	16,7	161,9	1.116,4	
7	15,8	153,1	1.055,9	
8	16,3	158,0	1.089,5	
<b>AVERAGE</b>			<b>1.112,2</b>	<b>[kPa]</b>
<b>DEV.STAND</b>		<b>133,7</b>		
<b>CV</b>		<b>12,0</b>		<b>[%]</b>

Tab. 4.75 Valori ottenuti dalla prova BBS su aggregato basaltico riciclato in condizioni wet

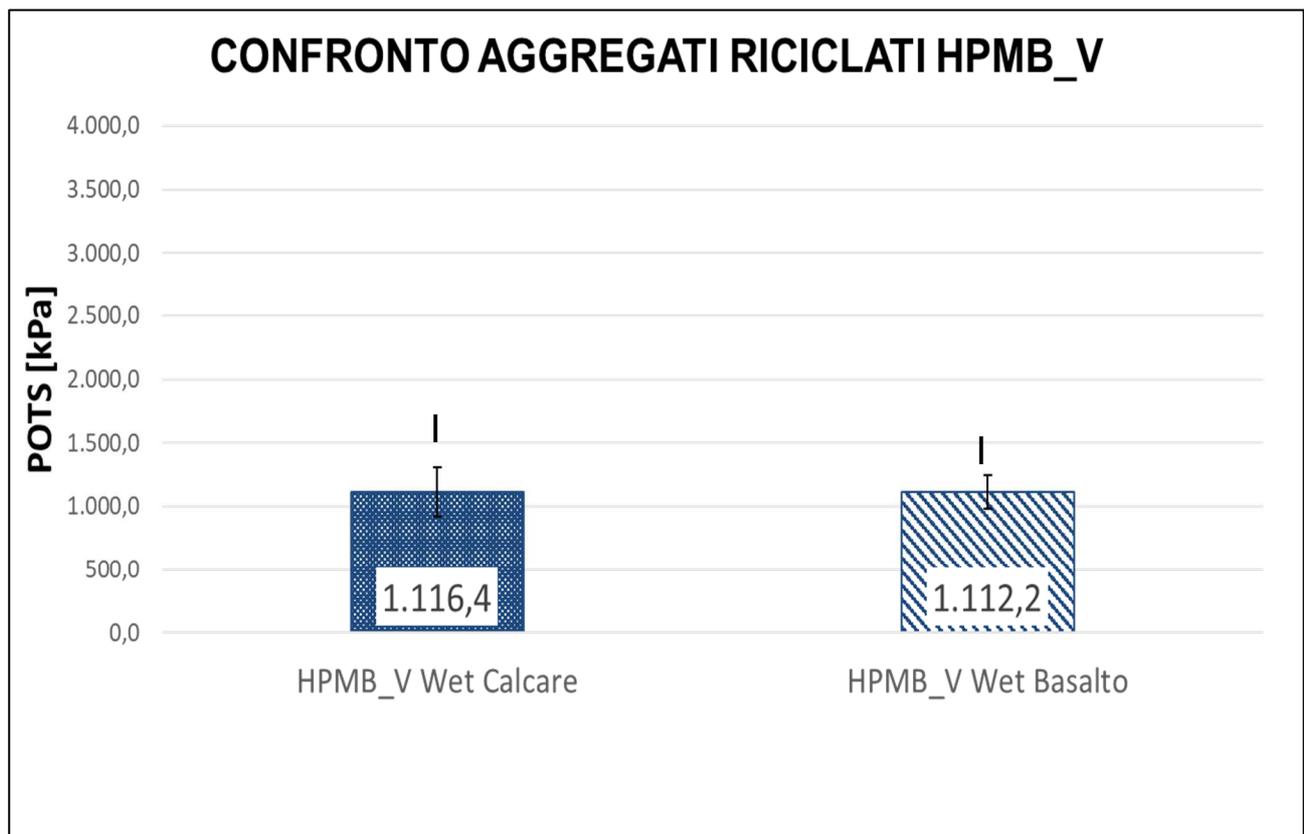


Fig. 4.59 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo e basaltico in condizioni wet



Fig. 4.59 Rotture indesiderate, aggregato calcareo



Fig. 4.60 Rotture indesiderate, aggregato basaltico

### Confronto prove BBS a temperature di incollaggio 170 °C e 180°C per bitume riciclato HPMB\_V

HPMB_V	T. 170°C		T. 180°C	
	MEDIA	DEV. STD.	MEDIA	DEV. STD.
HPMB_V Wet Calcare	1.116,4	191,7	1.286,5	85,6
HPMB_V Wet Basalto	1.112,2	133,7	1.215,4	82,4

Tab. 4.76 Confronto tra i valori medi ottenuti alla temperatura di incollaggio 170°C e 180°C

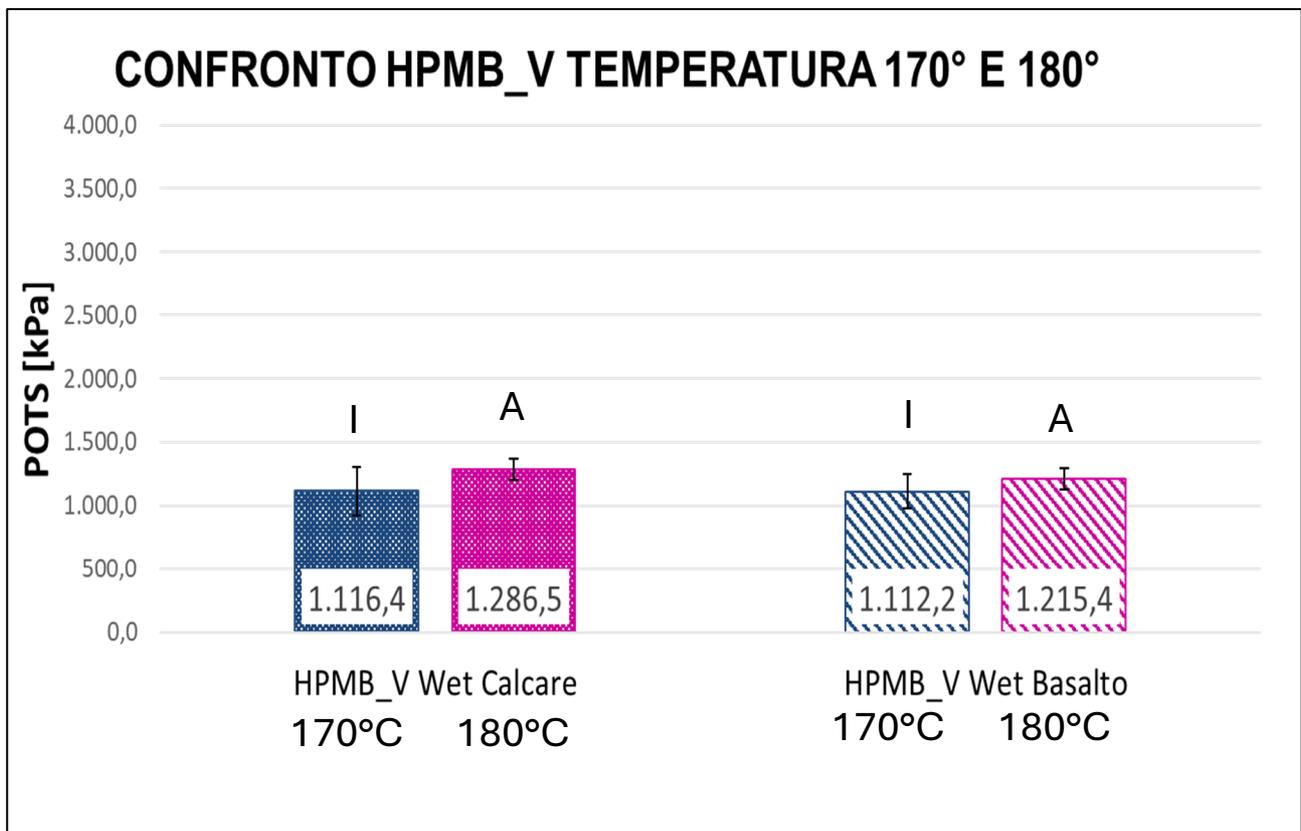


Fig. 4.61 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo e basaltico in condizioni wet a diverse temperature di incollaggio

#### 4.4.6. Confronto prove BBS sui quattro tipi di bitumi

Confronto con aggregati in calcare

	Tipo di Bitume	media POTS	Dev. St.
<b>calcare</b>	HPMB_O Calcare Dry	1569	152
	HPMB_O Calcare Wet	1837	267
	HPMB_V Calcare Dry	1410	74
	HPMB_V Calcare Wet	1287	86
	HPMB_A Calcare Dry	2021	184
	HPMB_A Calcare Wet	2093	109
	PMB Calcare Dry	2280	187
	PMB Calcare Wet	3174	222

Tab. 4.77 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle prove su aggregato calcareo

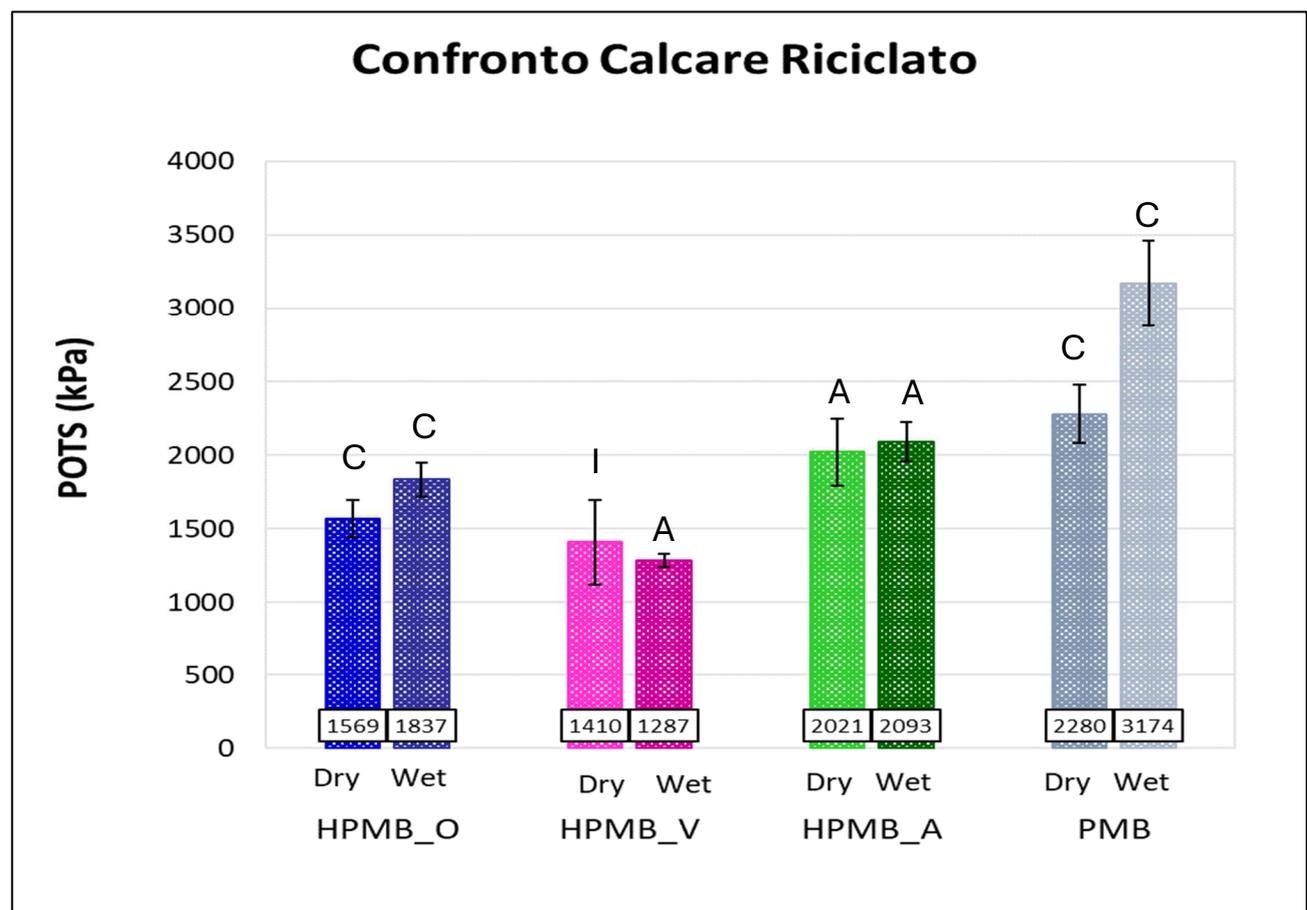


Fig. 4.62 Confronto valori POTS con aggregato riciclato calcareo in condizioni dry e wet

In questo grafico si riportano tutti i risultati ottenuti utilizzando un substrato calcareo riciclato, sia in condizioni dry che wet, per tutti e quattro i bitumi. Si può notare che il PMB ha i valori maggiori di POTS sia per la condizione dry che per la condizione wet rispetto a tutti gli altri bitumi. Inoltre, sia il PMB che l'HPMB\_O sono caratterizzati da rotture di tipo coesivo, tra i due il migliore risulta proprio il PMB in quanto ha POTS maggiori. Il bitume che presenta meno differenza di POTS tra le due condizioni è l'HPMB\_A e ciò significa che il condizionamento in acqua influisce poco in termini di coesione/adesione per il sistema bitume-aggregato. L'HPMB\_O riporta una notevole differenza tra il POTS della condizione dry e quello della condizione wet, questo significa che l'immersione in acqua incide sui risultati. Si può notare che l'HPMB\_V in condizioni wet riporta rotture adesive proprio perché è più debole mentre nella condizione dry è sovenuto il problema delle rotture indesiderate.

	Tipo di Bitume	media POTS	Dev. St.
<b>BASALTO</b>	HPMB_O Basalto Dry	1379	120
	HPMB_O Basalto Wet	1413	93
	HPMB_V Basalto Dry	1342	91
	HPMB_V Basalto Wet	1215	82
	HPMB_A Basalto Dry	1811	142
	HPMB_A Basalto Wet	1807	138
	PMB Basalto Dry	2019	379
	PMB Basalto Wet	2344	155

Tab. 4.78 Confronto tra i valori medi ottenuti dalle prove su aggregato basaltico

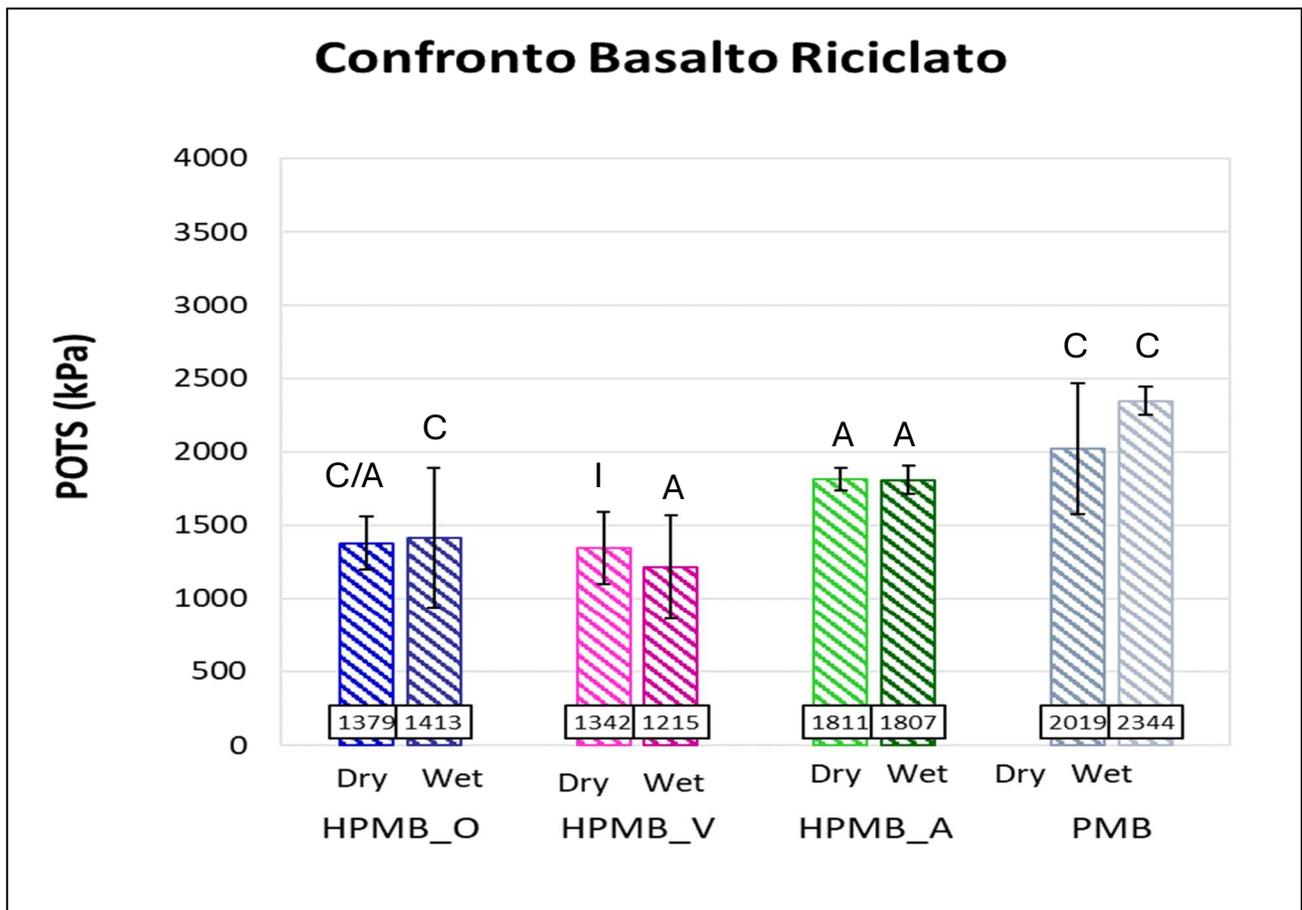


Fig. 4.63 Confronto valori POTS con aggregato riciclato basaltico in condizioni dry e wet

In questo grafico si riportano tutti i risultati ottenuti utilizzando un substrato basaltico riciclato, sia in condizioni dry che wet, per tutti e quattro i bitumi. Si può notare che, come nel caso di aggregato calcareo, il PMB ha i valori maggiori di POTS sia per la condizione dry che per la condizione wet rispetto a tutti gli altri bitumi. Il PMB e l'HPMB\_O sono caratterizzati da rotture di tipo coesivo e come in precedenza il migliore tra i due risulta proprio il PMB in quanto ha POTS maggiori. Il bitume che presenta meno differenza di POTS tra le due condizioni è l'HPMB\_A e ciò significa che l'immersione in acqua influisce poco in termini di coesione/adesione per il sistema bitume-aggregato. Il PMB riporta una notevole differenza tra il POTS della condizione dry e quello della condizione wet, questo significa che l'acqua incide sui risultati. Si può notare che l'HPMB\_V in condizioni wet riporta rotture adesive proprio perché è più debole mentre nella condizione dry è sovenuto il problema delle rotture indesiderate.

## 5. Conclusioni

A seguito di tutte le prove effettuate e dei risultati ottenuti si può concludere che il bitume HPMB\_V risulta il meno duro e il meno consistente rispetto agli altri tre bitumi testati. Il bitume super-modificato HPMB\_A (7,5% SBS) e il bitume modificato hard PMB (3,8% SBS) risultano i più duri e consistenti, hanno valori di penetrazione molto simili, in particolare il bitume HPMB\_A risulta il più duro, seguito poi dal PMB, dall'HPMB\_O e per ultimo l'HPMB\_V. I due bitumi PMB e HPMB\_A risultano avere proprietà molto simili e ciò è emerso non solo dalla prova di penetrazione ma anche dalle prove successive. Nella prova di palla-anello per questi due bitumi, infatti, si sono ottenute temperature di rammollimento molto vicine tra loro e anche per quanto riguarda la viscosità i valori sono risultati molto simili. La differenza si è riscontrata solo nella prova BBS dove il PMB ha manifestato rotture coesive mentre l'HPMB\_A adesive.

Dalla prova di palla-anello si è concluso che il bitume HPMB\_O è quello più resistente alle alte temperature in quanto ha un'elevata temperatura di rammollimento. L'HPMB\_A e il PMB possiedono invece la temperatura di rammollimento più bassa. L'HPMB\_V riporta una temperatura inferiore rispetto all'HPMB\_O ma superiore rispetto all'HPMB\_A e al PMB.

Dalla prova di viscosità si può affermare che l'HPMB\_O ha viscosità maggiore in confronto agli altri bitumi per le temperature di 115°C e di 135°C; mentre per le temperature di 160°C e di 180°C la viscosità maggiore risulta essere quella dell'HPMB\_V. Per quanto riguarda l'HPMB\_A presenta le viscosità più basse di tutti gli altri bitumi per qualsiasi temperatura. Si può notare che la viscosità dell'HPMB\_O dipende molto dalla temperatura mentre il PMB e l'HPMB\_A, che hanno viscosità molto simile per tutte le temperature, dipendono meno dall'HPMB\_O da essa. L'HPMB\_V riporta poca differenza tra il valore iniziale di viscosità a 115°C e quello finale a 180°C per cui si può affermare che il meno dipendente dalla temperatura rispetto a tutti gli altri bitumi testati.

Dalle prove BBS è risultato che il PMB ha i valori maggiori di POTS sia con l'aggregato calcareo che basaltico (sia vergine che riciclato), sia in condizioni dry che wet. Il bitume che è risultato meno sensibile all'immersione in acqua è stato l'HPMB\_O nel caso di substrato calcareo vergine e l'HPMB\_A in tutti gli altri casi. L'HPMB\_O e il PMB sono caratterizzati da rotture di tipo coesivo sia

in caso di aggregato calcareo che basaltico (sia vergine che riciclato), sia in condizioni dry che wet. L'HPMB\_A invece ha riportato sempre rotture di tipo adesivo in tutte le casistiche analizzate.

Inoltre, l'HPMB\_V è stato un bitume molto difficile da studiare in quanto si sono verificate numerose rotture indesiderate che non hanno permesso di avere risultati certi. Per ovviare a tale problematica si sono effettuate prove BBS a temperature di incollaggio differenti ma ciò non è risultato sufficiente poiché si sono presentate ugualmente rotture indesiderate. Su questo bitume quindi non possiamo concludere nulla in termini di proprietà adesive/coesive del sistema bitume-aggregato.

## Bibliografia

[1] State of the Practice for High Polymer-Modified Asphalt Binders and Mixtures - Jhony Habbouche<sup>1</sup>, Ilker Boz<sup>1</sup>, Brian K. Diefenderfer<sup>1</sup>, Bryan C. Smith<sup>2</sup>, and Sayed Hamidullah Adel<sup>3</sup>

[2] TOPS (Targeted Overlay Pavement Solutions) Highly Modified Asphalt Florida Case Study

[3] International Journal of Pavement Engineering  
A critical review of high polymer-modified asphalt binders and mixtures  
Jhony Habbouche, Elie Y. Hajj, Peter E. Sebaaly & Murugaiyah Piratheepan

[4] KRATON High Performance, Highly Modified Asphalt: The Next Generation of Hot Mix Binders

[5] Bitumen handbook ORLEN

## Sitografia

[S1] [https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna\\_del\\_bitume/articoli/2595\\_2.pdf](https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/articoli/2595_2.pdf)

[S2] <https://www.geoconsultingitalia.com/bitume-che-cose/#:~:text=Come%20definito%20nella%20norma%20UNI,o%20quasi%20solido%20a%20temperatura>

[S3] <https://it.wikipedia.org/wiki/Bitume#:~:text=I%20bitumi%20naturali%20si%20trovano,e%20in%20svariati%20altri%20paesi>.

[S4] <https://www.chimicaindustrialeessenziale.org/processi-industriali/distillazione/>

[S5] <https://www.siteb.it/wp-content/uploads/2018/06/db13.pdf>

[S6] <https://marini.fayat.com/it/prodotti/pmb-bitume-modificato>

[S7] <https://www.cittadiniecologisti.it/tecnologie-sostenibili/bitume-modificato/>

## **Normative**

[N1] UNI EN 12597 “Bitumen and bituminous binders, Terminology”

[N2] UNI EN 14023 “Bitumi e leganti bituminosi, Quadro delle specifiche riguardanti i bitumi modificati da polimeri”

[N3] UNI EN 1426 “Bitumi e leganti bituminosi, determinazione della penetrazione con ago”

[N4] UNI EN 1427 “Bitumi e leganti bituminosi, determinazione del punto di rammollimento, metodo biglia e anello”

[N5] UNI EN 13302 “Bitumi e leganti bituminosi, determinazione della viscosità dinamica di un legante bituminoso utilizzando un viscosimetro rotante”

[N6] AASHTO T 361-16 “Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Binder Bond Strength (BBS) Test”