



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA  
(DICEA)

---

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**Caratterizzazione prestazionale di miscele tiepide chiuse confezionate con  
bitumi ad alto tenore di polimeri**

**Performance characterization of warm dense-graded mixtures with  
highly polymer-modified bitumen**

*Relatore:*

**Prof. Ing. Francesco Canestrari**

*Tesi di laurea di:*

**Omar Guazzaroni**

*Correlatore:*

**Ing. Lorenzo Paolo Ingrassia**

---

Anno accademico 2023/2024



# Sommario

Introduzione.....	5
Capitolo 1 – Stato dell’arte.....	7
1.1 Le pavimentazioni stradali.....	7
1.1.1 Le pavimentazioni flessibili.....	7
1.2 Legante bituminoso.....	8
1.2.1 Bitume modificato con polimeri (PMB).....	10
1.2.2 Bitume modificato con polimeri SBS.....	12
1.2.3 Compatibilità Bitume – Polimero.....	14
1.2.4 L’impiego di bitume modificato con polimeri in Warm Mix Asphalt (WMA)..	16
1.2.5 Bitume ad alto tenore di modifica (HPMB).....	16
1.2.6 Esperienze sul campo impiegando HPMB.....	20
1.2.7 Sfide nell’uso di HPMB.....	21
Capitolo 2 – Materiali.....	22
2.1 Aggregati di riciclo (RAP).....	23
2.1.1 RAP 0/14.....	23
2.2 Aggregati vergini.....	24
2.2.1 Sabbia 0/4.....	25
2.2.2 Pietrisco 6.3/16.....	26
2.2.3 Pietrisco 16/22.4.....	27
2.3 Bitume modificato hard SBS (PMB).....	29
2.4 Bitume ad alto tenore di modifica (HPMB).....	30
2.4.1 HPMB “HA”.....	30
2.4.2 HPMB “HO”.....	30

2.4.3 HPMB “HV” .....	31
2.5 Additivo Iterlow T .....	31
Capitolo 3 - Programma sperimentale .....	32
3.1 Obiettivo della sperimentazione .....	32
3.2 Mix design .....	33
3.3 Apparecchiature e protocolli di prova.....	36
3.3.1 Analisi granulometrica .....	36
3.3.2 Miscelazione .....	38
3.3.3 Compattazione e preparazione dei provini.....	40
3.3.4 Determinazione delle proprietà volumetriche e della compattabilità.....	46
3.3.5 Condizionamento dei provini.....	50
3.3.6 Prova di rottura a trazione indiretta.....	51
3.3.7 Prova di modulo di rigidezza a trazione indiretta .....	54
3.3.8 Prova di resistenza a fatica a trazione indiretta.....	61
Capitolo 4 – Analisi dei risultati.....	69
4.1 Valutazione della compattabilità.....	69
4.2 Prove di rottura a trazione indiretta .....	71
4.2.1 Miscela DG_P_130_0.5 .....	71
4.2.2 Miscela DG_HO_130_0.5.....	72
4.2.3 Miscela DG_HA_130_0.5.....	73
4.2.4 Miscela DG_HA_130_0.8.....	74
4.2.5 Miscela DG_HV_130_0.5.....	75
4.2.6 Confronto .....	76
4.3 Prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta .....	77
4.3.1 Miscela DG_P_130_0.5 .....	77

4.3.2 Miscela DG_HO_130_0.5.....	78
4.3.3 Miscela DG_HA_130_0.5.....	80
4.3.4 Miscela DG_HV_130_0.5.....	81
4.3.5 Confronto .....	82
4.4 Prove di rottura a fatica.....	83
4.4.1 Miscela DG_P_130_0.5 .....	83
4.4.2 Miscela DG_HO_130_0.5.....	84
4.4.3 Miscela DG_HA_130_0.5.....	85
4.4.4 Miscela DG_HV_130_0.5.....	86
4.4.5 Confronto .....	87
Capitolo 5 – Conclusioni .....	90
Riferimenti.....	92

## ***Introduzione***

Il progresso tecnologico si concretizza ogniqualvolta l'uomo si spinge oltre quello che vedeva come un limite fino a quel giorno. Negli ultimi decenni il trasporto stradale è aumentato significativamente. Nell'ottica di sviluppo sostenibile, il mercato chiede sempre più materiali ad alte prestazioni per garantire maggior durabilità. Nell'ambito delle infrastrutture, in particolare nelle pavimentazioni stradali, l'ingegnere civile trova soluzione nell'impiego di materiali altamente performanti quali sono i bitumi modificati (Polymer-Modified Bitumen, PMB). Recentemente, le principali aziende del settore hanno introdotto sul mercato bitumi ad alto tenore di modifica (Highly Polymer-Modified Bitumen, HPMB) con l'intento di incrementare ulteriormente le prestazioni. La sperimentazione, condotta sulla stessa tipologia di miscela ma con tipologia di bitume diversa, è stata sviluppata presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura" dell'Università Politecnica delle Marche.

La caratterizzazione fisica e meccanica è stata effettuata attraverso le seguenti prove:

- valutazione della compattabilità (vuoti residui e CEI);
- prove di rottura a trazione indiretta (ITS);
- prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- prove di rottura a fatica (ITFT)

La presente tesi si articola in cinque capitoli:

- 1) Stato dell'arte: introduce l'impiego di bitumi modificati nelle pavimentazioni in conglomerato bituminoso;
- 2) Materiali utilizzati nella sperimentazione: descrive i materiali usati nel confezionamento delle miscele oggetto di studio;
- 3) Programma sperimentale: illustra l'obiettivo della sperimentazione, le miscele di progetto, le procedure di laboratorio, il confezionamento dei provini;
- 4) Analisi dei risultati: espone i risultati ottenuti dalle prove eseguite sui campioni esaminati con l'aiuto di tabelle e grafici relativi alle elaborazioni dei dati per ottenere una chiara e immediata lettura dei valori ottenuti;
- 5) Conclusioni

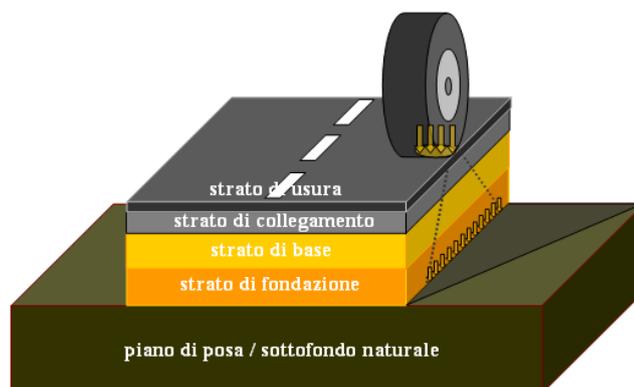
## **Capitolo 1 – Stato dell’arte**

### **1.1 Le pavimentazioni stradali**

La pavimentazione stradale, anche detta sovrastruttura, è la parte superiore del corpo stradale direttamente interessata dal moto dei veicoli. Essa è costituita da un insieme di strati uno sopra l’altro, di materiali e spessori diversi. I requisiti della sovrastruttura sono strutturali e funzionali: sopportare le azioni indotte dal traffico e trasmetterle e distribuirle al terreno di appoggio (sottofondo), nonché, di garantire agli utenti, sicurezza e comfort di marcia. Le pavimentazioni si catalogano principalmente in rigide, semi-rigide e flessibili; in tale documento si darà spazio principalmente alle pavimentazioni flessibili.

#### **1.1.1 Le pavimentazioni flessibili**

Una sovrastruttura flessibile si compone solitamente di strato di base, binder e tappeto d’usura (Fig. 1.1). Allo strato di base compete la funzione strutturale di ripartizione dei carichi; il binder svolge sostanzialmente una funzione di collegamento, mentre il tappeto d’usura contribuisce alla regolarità e all’aderenza della pavimentazione.



*Fig.1.1 – Schema pavimentazione flessibile*

Il materiale principalmente utilizzato per la costruzione di tali strati è il conglomerato bituminoso. Esso è costituito di aggregati (vergini o riciclati), filler, legante bituminoso ed eventuali additivi. L’impiego di materiali riciclati riguarda per la maggior parte dei casi gli strati di base e binder ma potrebbe interessare anche il tappeto d’usura. Il legante bituminoso

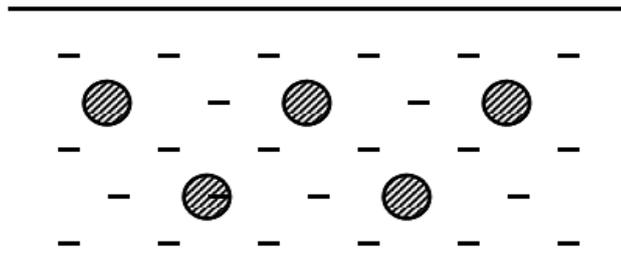
si distingue in bitume tal quale, bitume modificato con polimeri e bitume ad alto tenore di modifica. Quest'ultimo sarà l'oggetto principe di tale sperimentazione.

## ***1.2 Legante bituminoso***

I leganti bituminosi sono leganti organici. Il bitume conferisce, alla miscela, la coesione necessaria a resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute ai carichi superficiali indotti dal carico di traffico. Il bitume è un materiale termo-plastico, il suo comportamento è termo-dipendente, la consistenza e la viscosità cambiano al variare della temperatura.

Il bitume è un sottoprodotto della distillazione del petrolio. La distillazione è un processo fisico durante il quale vengono separate le fasi di una miscela (petrolio grezzo) per effetto delle diverse temperature di ebollizione e di condensazione che competono a ciascuna di esse. A seconda del tipo di petrolio si avranno differenze sia nella qualità che nella quantità di bitume ricavato. Le proprietà meccaniche e fisiche sono strettamente legate alla composizione chimica e strutturale del bitume e influenzano le prestazioni in esercizio. Quanto alla chimica del materiale, il bitume è costituito da asfalteni e malteni (resine e oli). Gli asfalteni sono polveri solide, friabili e di colore bruno; essi hanno elevato peso molecolare, danno "corpo" al bitume e sono presenti circa per il 10÷20% in peso. Le resine sono sostanze semi-solide appiccicose, conferiscono al bitume le proprietà leganti e impermeabilizzanti e fungono da agenti peptizzanti per gli asfalteni, in assenza delle resine gli asfalteni tenderebbero ad aggregarsi e a flocculare. Gli oli sono liquidi bianchi o incolori, caratterizzati da basso peso molecolare e fungono da agenti flocculanti nei confronti degli asfalteni.

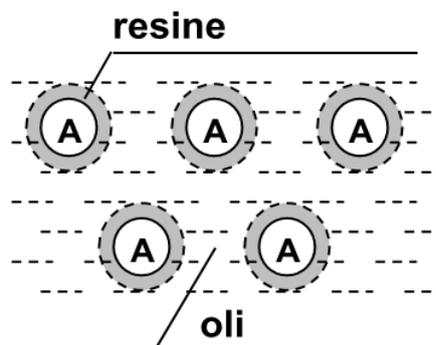
Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi modelli fisici per il bitume. Il primo modello (Rosinger (1914)[1]-Errera-Nellensteyn (1923)) prevedeva asfalteni con struttura molto vicina al carbonio, dispersione colloidale di micelle asfalteniche (solide) in una fase oleosa (fluida) grazie alla presenza di agenti peptizzanti come le resine (Fig. 1.2).



*Fig.1.2 – Modello chimico del bitume - Rosinger (1914)-Errera-Nellensteyn (1923)*

Il modello più recente (Pfeiffer and Saal (1940)[2]-Labout (1950)) prevede, in realtà, l'esistenza di due configurazioni differenti: Sol model e Gel model. Nel Sol model le resine fungono da agente peptizzante per gli asfalti in modo che le micelle con interagiscano. Esso assume un comportamento liquido newtoniano ad alta temperatura mentre risulta molto viscoso alle basse temperature. Nel Gel model, invece, le resine sono poco efficaci nel peptizzare gli asfalti che risultano completamente interconnessi. Questo modello include un'eccessiva presenza di paraffine rispetto alle resine e inoltre tende a ridurre la solubilità; il suo comportamento è di fluido non newtoniano (viscoelastico) ad alta temperatura mentre assume un comportamento solido elastico a bassa temperatura.

In realtà il modello più realistico prevede la coesistenza di entrambi i modelli (Fig. 1.3). A bassa e media temperatura le proprietà reologiche del bitume dipendono dalla quantità di asfalti presenti; considerando temperatura costante, se gli asfalti aumentano allora la viscosità aumenta. Oggi si ritiene che tutti i bitumi abbiano la stessa struttura; l'unica differenza tra il sol e il gel è la frazione di volume della fase solida dispersa, cioè la quantità di asfalti.



*Fig.1.3 – Modello chimico del bitume – Ipotesi attuale*

### ***1.2.1 Bitume modificato con polimeri (PMB)***

I bitumi modificati sono leganti le cui proprietà sono state modificate attraverso l'aggiunta di sostanze chimiche (di solito polimeri) che alterano la struttura sia chimica che fisica e le proprietà meccaniche del bitume di base. Nel corso degli anni sono stati osservati i numerosi vantaggi anche se restano ancora dei limiti come la bassa resistenza all'invecchiamento e la scarsa stabilità allo stoccaggio, oggetto di studio in numerose ricerche [3].

Le prime pubblicazioni sui bitumi modificati risalgono al 1938 ma la reale espansione della ricerca dei diversi metodi di produzione e processi di formazione delle modifiche si è sviluppata solo da 50 anni ad oggi. I primi impieghi furono nel settore delle impermeabilizzazioni per produrre isolanti in grado di assorbire contrazioni ed espansioni termiche. Successivamente fu utilizzato anche in campo stradale per migliorare le prestazioni dei conglomerati bituminosi in termini di adesione e proprietà meccaniche, adeguandole alle esigenze determinate dall'aumento del traffico e dalle condizioni climatiche. I principali motivi per cui si impiegano bitumi modificati sono: maggiore resistenza all'ormaiamento alle alte temperature e riduzione di problemi di fessurazione termica alle basse temperature. Inoltre, per quanto riguarda gli strati di base, oggetto d'interesse di tale sperimentazione, grazie all'uso di bitumi modificati si denota un aumento della resistenza a fatica.

Come già indicato gli agenti modificanti sono i polimeri: macromolecole in cui qualche gruppo di atomi (molecole o insieme di molecole dette monomeri) è ripetuto per un grande numero di volte (Fig. 1.4).



*Fig.1.4 – Composizione schematica dei polimeri*

La sequenza e la struttura chimica del monomero determinano le proprietà fisiche del polimero, e vista la grande varietà di polimeri a disposizione sul mercato è possibile il miglioramento mirato di specifiche prestazioni del bitume. I polimeri si classificano essenzialmente in termoindurenti (non utilizzati in campo stradale) e termoplastici. I termoplastici, se riscaldati, fluidificano diventando reversibilmente malleabili e vengono

inglobati nei bitumi ad alta temperatura, con il risultato di una miscela paragonabile ad un liquido viscoso; essi si dividono, a loro volta, in due grandi gruppi: plastomeri e elastomeri.

I polimeri termoplastici plastomerici sono caratterizzati da una struttura reticolare rigida e resistente e dunque, non modificano in maniera significativa la risposta elastica del bitume ma ne determinano un sostanziale incremento della resistenza a rottura. Le principali tipologie sono: EVA (etilene-vinilacetato), EMA (etilene-metilacrilato), EBA (etilene-butilacrilato), PIB (polisobutylene), EPDM (etilene-propilene diene), PE (polietilene) e PP (polipropilene).

I polimeri termoplastici elastomerici sono caratterizzati da una deformazione prevalentemente elastica e le principali tipologie sono: SBS (stirene-butadiene-stirene), SIS (stirene-isopropene-stirene), SB (stirene-butadiene) e SBR (stirene-butadiene-rubber). I più utilizzati nei bitumi modificati sono i polimeri termoplastici elastomerici stirenici che permettono la produzione di bitumi elastomerizzati. Questi ultimi migliorano il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici.

La classificazione dei bitumi modificati con polimeri segue la UNI EN 14023 (Tab. 1.1). Pertanto, la designazione di un bitume modificato viene fatta indicando l'intervallo di penetrazione e il valore del punto di rammollimento della corrispondente classe.

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								

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						

Tab.1.1 – Proprietà dei bitumi modificati con polimeri

### 1.2.2 Bitume modificato con polimeri SBS

Nei bitumi stradali i polimeri più usati sono gli SBS il cui peso molecolare può variare tra 80000 e 300000. Il contenuto di stirene si aggira intorno al 20-30% del peso totale del polimero. Un aumento del peso molecolare e/o del contenuto di stirene potrebbe causare una compatibilità più bassa con i bitumi e portare problemi di dispersione e instabilità allo stoccaggio a più alte temperature. La composizione morfologica di tale polimero, formata da domini discontinui di polistirene legati con matrice continua di polibutadiene (Fig. 1.5), spiega la risposta tipica di questi composti assimilabile a quello di una gomma vulcanizzata con aggiunta di filler.

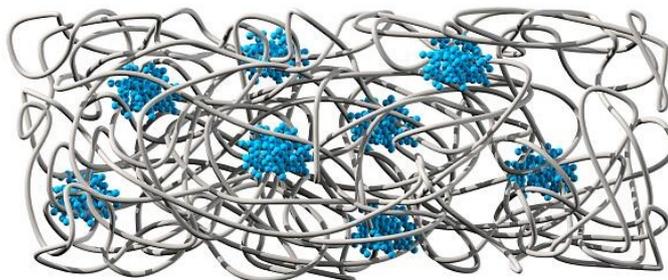


Fig.1.5 – Struttura eterofase di un polimero elastomerico stirenico

I polimeri termoplastici elastomerici utilizzano legami termici e chimici per dare luogo ad un reticolo. Una struttura fisicamente “intrecciata” (crosslinked) può essere sviluppata utilizzando dei copolimeri a tre blocchi. Nel caso di polimeri SBS, i componenti stirenici tendono a formare dei cluster sotto l’effetto di azioni termodinamiche. Ciò determina la formazione di ampie sfere di domini di polistirene connesse da filamenti elastici di butadiene. I domini stirenici rappresentano lo spazio in cui possono svilupparsi dei legami tipo “crosslink” multipli; essi agiscono inoltre da filler. Tale struttura è stabile e possiede una buona resistenza in un ampio intervallo di temperature (circa 100°C) fino alla temperatura di transizione vetrosa dei domini stirenici. Per temperature maggiori di 150°C, le catene lineari a tre blocchi risultano casualmente distribuite all’interno della massa di bitume (come accade durante la fase di produzione del bitume modificato e durante la miscelazione del conglomerato bituminoso). Una volta diminuita la temperatura, i domini stirenici tendono di nuovo a raggrupparsi per la formazione di legami crosslink all’interno del bitume. La capacità dei polimeri di formare un sistema completamente “crosslinked” dipende dalla concentrazione dei polimeri nel bitume e dalle proprietà termodinamiche del sistema combinato.

Per un bitume ideale la consistenza rimane costante all’interno dell’intervallo della temperatura di esercizio e decresce improvvisamente nel campo delle temperature di posa in opera. Per un bitume reale, invece, la consistenza tende ad avere un andamento lineare al variare della temperatura, questo comporta di norma proprietà inadeguate alle temperature di esercizio. Per un bitume modificato SBS il comportamento si approssima a quello ideale proprio all’interno dell’intervallo della temperatura di esercizio (Fig. 1.6).

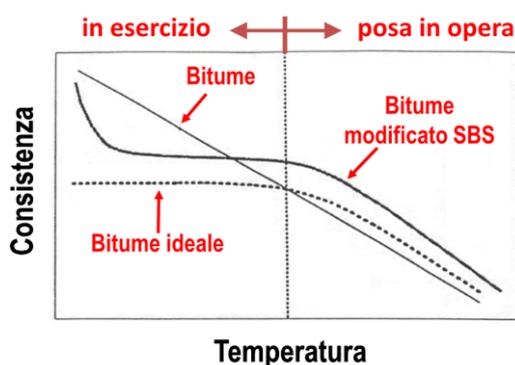


Fig.1.6 – Consistenza del bitume in funzione della temperatura

### ***1.2.3 Compatibilità Bitume – Polimero***

In termini termodinamici, la compatibilità è definita come una situazione dove il bitume e polimero costituiscono una fase unica, quindi parlare di compatibilità è sinonimo di solubilità di un polimero in un bitume. In termini ingegneristici, invece, la compatibilità è definita come una situazione dove bitume e polimero possono essere combinati dando vita ad un prodotto di qualità migliori e dove tale combinazione può essere maneggiata senza eccessive precauzioni e pertanto, piuttosto che parlare di compatibilità, si parla di adattabilità di un polimero in un bitume.

Studi recenti hanno rivelato l'importanza della composizione chimica del bitume di base per la sua modifica. Si può affermare che, sebbene alcuni polimeri/additivi possano migliorare uno o alcuni aspetti delle proprietà del bitume grezzo, possono portare a problemi di compatibilità nello stoccaggio e nella produzione. A questo proposito, diversi studi hanno dimostrato l'efficacia delle cere per migliorare la compatibilità dei polimeri con il bitume, portando vantaggi nella produzione di conglomerato bituminoso tiepido (warm mix asphalt, WMA) [4].

#### ***Compatibilità - Solubilità***

La solubilità di un polimero in un bitume dipende principalmente dalla quantità e dal tipo di asfalteni presenti nel bitume, nonché dalla differenza tra i parametri di solubilità del polimero e della fase maltenica del bitume. Gli idrocarburi paraffinici hanno un parametro di solubilità pari a 8  $[\text{cal}/\text{cm}^3]^{0.5}$  mentre quelli aromatici pari a 9  $[\text{cal}/\text{cm}^3]^{0.5}$ . Pertanto, per avere una corretta interazione polimero-bitume in termini termodinamici, il parametro di solubilità di un polimero deve rientrare all'interno di questo intervallo (8-9). Il polimero stirene-butadiene-stirene (SBS) è caratterizzato da un parametro di interesse di 8.5  $[\text{cal}/\text{cm}^3]^{0.5}$  e dunque risulta solubile nel bitume.

Inoltre, per ciascuna miscela bitume-polimero è possibile individuare una temperatura critica definita come “Upper Critical Solution Temperature” (UCST) tale che:

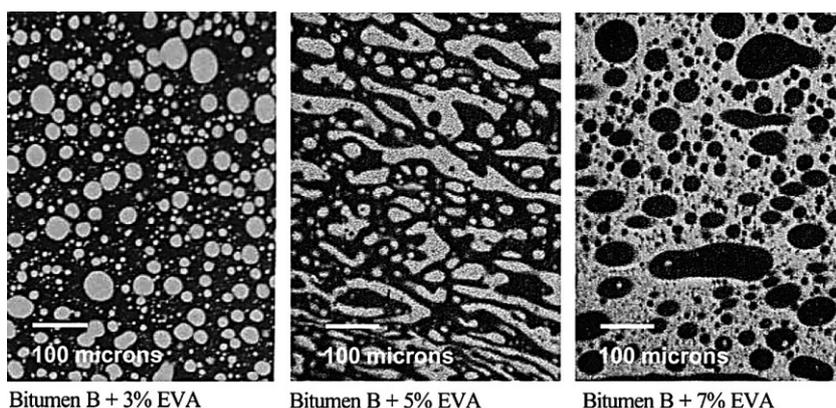
- Se  $T > \text{UCST} \rightarrow$  esistenza di una fase unica;
- Se  $T < \text{UCST} \rightarrow$  esistenza di due fasi distinte.

Pertanto, ogniqualvolta si citi la compatibilità dei polimeri nel bitume è bene definire la composizione e a quale temperatura dovrebbe esistere il sistema monofase.

### ***Compatibilità - Adattabilità***

Le miscele di bitume e polimeri, siano essi plastomeri o elastomeri, sono sistemi a due fasi, costituiti da una prima fase ricca di polimero e una seconda ricca di asfalteni non adsorbiti dal polimero. Con particolare riguardo al volume delle due fasi, si può dire che un copolimero come SBS può assorbire fino a 9 volte il suo stesso peso di componenti del bitume. Considerando tale aspetto è possibile individuare (Fig. 1.7) tre diverse configurazioni nella microstruttura della miscela bitume-polimero in funzione della percentuale di polimero aggiunto:

- Con un basso contenuto di polimero ( $< 5\%$ ) si osserva al microscopio una fase continua di bitume (scura) con una dispersione di polimero;
- Con un elevato contenuto di polimero ( $> 5\%$ ) è possibile osservare al microscopio una fase continua di polimero (chiara) con una ricca dispersione di asfalteni;
- Con un contenuto di polimero di circa il 5% si osservano al microscopio due fasi continue.



*Fig.1.7 – Osservazione al microscopio di bitume a diverso contenuto di polimero[3]*

Con particolare riferimento alla percentuale di polimero aggiunta al bitume è possibile affermare che un aumento del contenuto di polimero comporta: un aumento della

temperatura di rammollimento, un aumento della viscosità a parità di temperatura e minore suscettibilità termica.

#### ***1.2.4 L'impiego di bitume modificato con polimeri in Warm Mix Asphalt (WMA)***

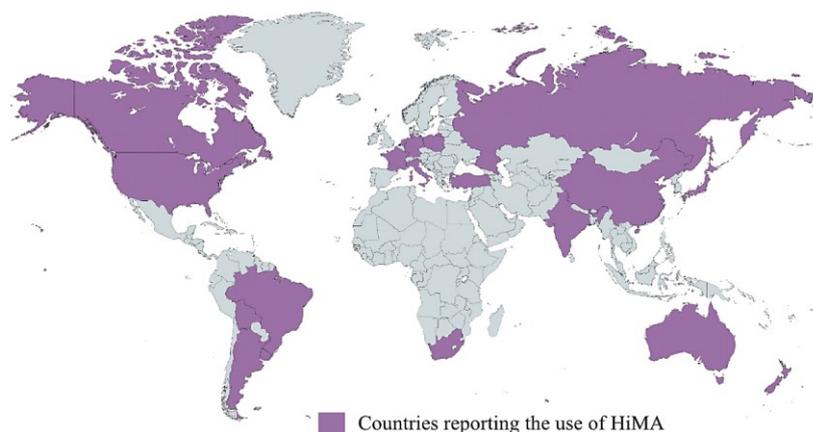
Negli ultimi anni è stata introdotta una nuova tecnologia che combina l'impiego di bitume modificato con polimeri con la tecnica del Warm Mix Asphalt. La tecnica "Warm" è relativamente nuova rispetto all'impiego dei PMB, ma il suo sviluppo è in rapida crescita grazie ai suoi vantaggi economici e ambientali. Infatti, i conglomerati bituminosi tiepidi permettono un minor dispendio di energia e costi nella produzione, nonché minori emissioni di inquinanti atmosferici. Inoltre, grazie alla tale tecnologia è possibile estendere le distanze di trasporto. L'ottenimento di tali risultati è possibile grazie all'introduzione di additivi.

Oggi si assiste a uno sviluppo tecnologico che può mantenere i vantaggi di entrambe le tecnologie (WMA e PMB), anche se questo non è un compito facile perché ad esempio alcune cere utilizzate come modificatori a caldo riducono la viscosità ad alta temperatura e aumentano la rigidità a bassa temperatura, mentre i polimeri fanno essenzialmente il contrario. Una miscela ternaria bitume-polimero-cera ha proprietà significativamente diverse (come la viscoelasticità) da quelle prevedibili sovrapponendo l'effetto della sola cera e del polimero [4].

#### ***1.2.5 Bitume ad alto tenore di modifica (HPMB)***

La crescente domanda di carico delle infrastrutture stradali ha promosso l'uso di nuove tecnologie e di materiali più avanzati per migliorare la loro risposta meccanica, nonché le prestazioni e la durabilità delle pavimentazioni. Nel corso degli ultimi decenni si è potuto osservare come l'introduzione di bitume modificato nei conglomerati bituminosi per pavimentazioni abbia potuto garantire maggior resistenza alle sollecitazioni da traffico offrendo durabilità a lungo termine. Le dosi comuni di modifica con polimero variano dal 2,5 al 3,5% in peso del bitume. Recentemente sono state introdotte sul mercato dosi di modifica polimerica più elevate e si ritiene che le miscele confezionate utilizzando bitume ad alto contenuto di polimeri (Highly Polymer-modified bitumen, HPMB) possano offrire ulteriori vantaggi alle pavimentazioni flessibili sottoposte a carichi di traffico pesanti e/o lenti. È importante notare che non esiste un valore specifico per "alto contenuto" nel concetto

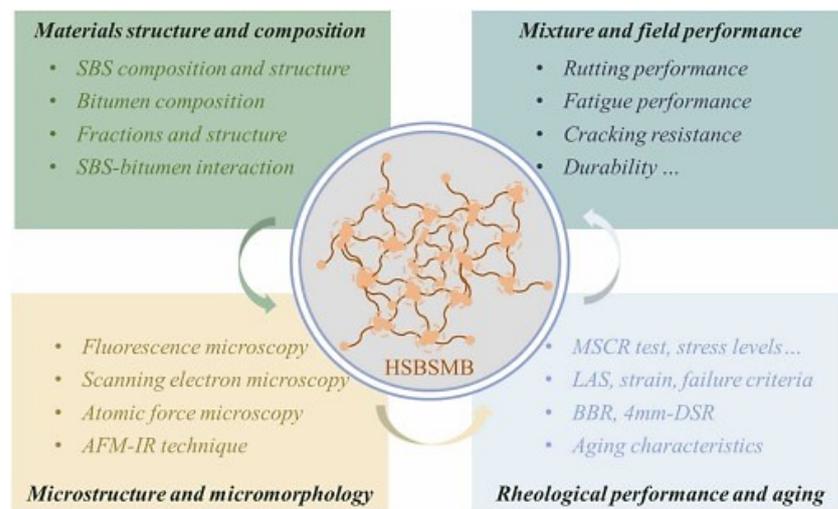
attuale di bitume modificato con polimeri in quanto è del tutto relativo e si riferisce ad un contenuto di polimeri più elevato dei bitumi modificati convenzionalmente utilizzati. Comunque, dalle ultime ricerche, si evince che è buona pratica impiegare un dosaggio di polimeri tra il 7% e il 9%. Per raggiungere un contenuto così elevato si impiegano polimeri SBS, il processo di polimerizzazione differisce dal PMB convenzionale. Sebbene non esista una guida pratica e dettagliata che tratti l'impiego di questo materiale innovativo, l'industria del conglomerato bituminoso si sta muovendo sempre più verso l'uso di questi materiali più durevoli per migliorare le prestazioni a lungo termine per strade di nuova costruzione (Fig. 1.8).



*Fig.1.8 – L'uso di Highly Modified Asphalt (HiMA) nel mondo [5]*

Gli studi di laboratorio esaminati da Jhony Habbouche et al. [6] hanno indicato che l'aumento del contenuto di polimeri continua a migliorare le proprietà prestazionali dei leganti e delle miscele. Inoltre, i progetti sul campo esaminati hanno mostrato risultati incoraggianti senza presentare problemi legati alla costruzione. Un'analisi dei risultati ha portato alla conclusione che le miscele confezionate con HPMB possono portare ad una riduzione fino al 40% dello spessore dello strato di pavimentazione flessibile con una notevole riduzione dei costi [6]. In particolare, si evince che aumentando il contenuto di polimero SBS da 0%, 3%, 6% e 7.5%, le proprietà prestazionali in termini di fatica e fessurazione termica migliorano.

Lo studio di questo materiale relativamente nuovo deve essere sviluppato con diversi approcci fisici e chimici. Come approfondito da W. Wu et al. [7], il cui interesse principe è stato quello di definire diverse prospettive sull'uso di high-content SBS polymer-modified bitumen (definito HSBSMB), il campo di ricerca intorno a questo materiale è vasto e complesso (Fig. 1.9).



*Fig.1.9 – Campi di ricerca riguardanti HSBSMB [7]*

Alla scala del bitume, i metodi reologici sperimentali sviluppati sulla base di PMB convenzionali possono presentare alcune carenze e devono essere migliorati a causa delle grandi differenze nella struttura interna e nelle caratteristiche reologiche dell'HPMB [7].

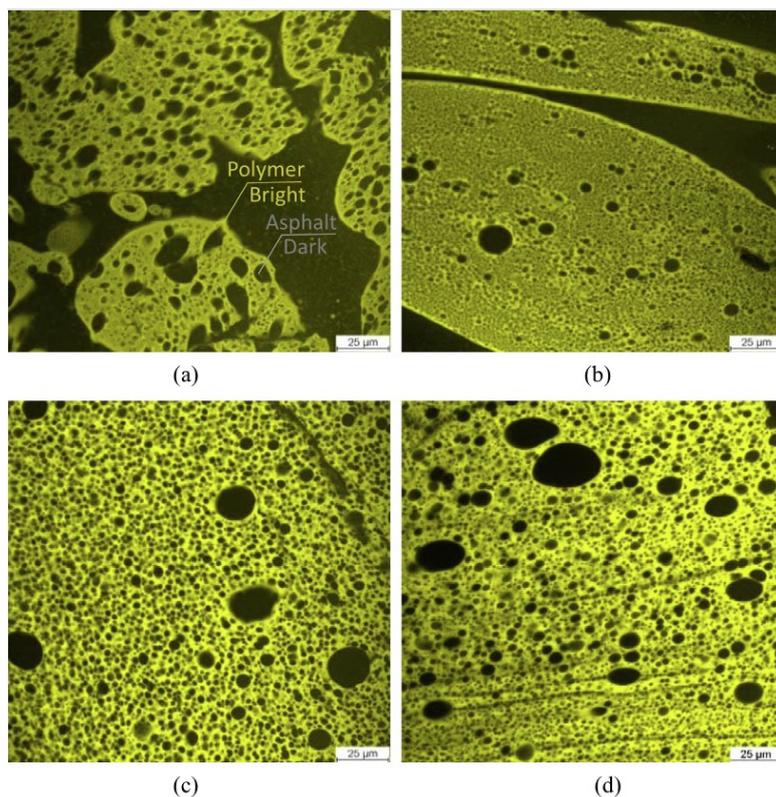
Il bitume modificato ad alto tenore di polimeri è oggi largamente impiegato nei tappeti d'usura aperti anche se il suo comportamento nei confronti dell'invecchiamento non è stato ancora ben compreso. A tal proposito, nell'ultimo decennio sono stati proposti studi che affrontano questa tematica. In particolare Chuanqi Yan et al. [8] propongono uno studio nel quale gli HPMB (7.5% di SBS) vengono invecchiati in modo diversificato in laboratorio tramite Rolling thin film oven test (RTFOT) e Pressure Ageing Vessel (PAV) e le evoluzioni chimiche e reologiche durante l'invecchiamento sono state monitorate tramite Gel permeation chromatography (GPC), Spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier (FTIR), analisi con reometro a taglio dinamico (DSR) e master curve. I risultati della GPC e

dell'FTIR mostrano che generalmente la degradazione del polimero avviene nella fase iniziale dell'invecchiamento. I test reologici evidenziano che l'invecchiamento porta gli HPMB ad un comportamento meno elastico dovuto alla degradazione del polimero [8]. Tramite una ricerca sperimentale molto simile, Peng Lin et al. [9] osserva che il dosaggio di polimero può essere portato a livelli ancora superiori a quanto citato fino ad ora. Infatti, dopo monitoraggio di diversi parametri a diversi dosaggi di polimeri, viene presentato un quadro d'insieme (Tab. 1.2) nonché il suggerimento di un contenuto di SBS ottimale del 9% sul bitume che risulta vantaggioso sia in termini prestazionali che economici [9]. Inoltre, è stata identificata la capacità degli HPMB di rallentare l'invecchiamento da ossidazione del bitume [6].

Test	Recommend Criteria	Recommended SBS content
Rutting Parameter	SBS Control	≥8%
R <sub>3,2</sub>	None	More is better
Aging Residual Ratio of R <sub>3,2</sub>	>70%	≥9%
J <sub>nr3,2</sub>	<1.0	≥9%
Master Curve	Obvious Plateau region	≥11%
GPC	Obvious Polymer Peak	≥9%
FTIR	None	More is better

*Tab.1.2 – Contenuti di SBS raccomandati [9]*

L'importanza dei risultati ottenuti da diversi studi riguardanti l'invecchiamento degli HPMB diventa molto significativa per i progetti di pavimentazioni a lungo termine. Strategie di progettazione più elaborate, come ad esempio progetti a lunga durata, potrebbero potenzialmente trarre grandi benefici da un miglioramento delle prestazioni per tutta la durata in esercizio considerata [10]. Naturalmente, l'aumento del dosaggio di polimero sulla modifica del bitume vergine porta alla produzione di materiali molto differenti dal punto di vista fisico, chimico e prestazionale (Fig. 1.10).



*Fig.1.10 – Osservazioni al microscopio a fluorescenza di HPMB con diverso dosaggio di SBS  
(a)6%, (b)7.5%, (c)9%, (d)12% [11]*

### **1.2.6 Esperienze sul campo impiegando HPMB**

La valutazione delle prestazioni sul campo è fondamentale, poiché gli esperimenti di laboratorio potrebbero portare a risultati imprecisi a causa delle limitazioni degli strumenti o dei metodi di valutazione. Le prestazioni effettive della pavimentazione sono influenzate dalla combinazione del tipo di sovrastruttura, condizioni ambientali e carichi di traffico. Analogamente agli effetti della preparazione del campione in laboratorio, anche la fase di costruzione influenza fortemente le prestazioni del prodotto finale. Le pavimentazioni costruite con HSBSMB sono in graduale aumento; una selezione di lavori eseguiti in passato è riassunta di seguito (Tab. 1.3). Per la maggior parte dei progetti è stato scelto un contenuto di SBS del 7.5%. Sebbene sia stato riferito che i tecnici sul campo ritengono che la miscela HSBSMB abbia una lavorabilità simile alla miscela con bitume modificato convenzionale, vale la pena notare che, per quanto riguarda le esperienze passate, sono state adottate temperature d’impianto e di costruzione maggiori rispetto al PMB convenzionale.

1	2014	Virginia, USA	HSBSMB: 7.5%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Placement temp: 140 - 168 °C; (higher 8 °C than PMB AC)</li> <li>Paving temp: N/A</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Milling 1.5 inches of the original pavement;</li> <li>Then covered with 1.5 inches of HSBSMB mixture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>After 15 months;               <ol style="list-style-type: none"> <li>No visible deterioration;</li> <li>HSBSMB works well as a patch;</li> <li>Performing satisfactorily.</li> </ol> </li> </ul>
2	2009	NCAT Test Track	HSBSMB: 7.5% PMB: 2.8%	<ul style="list-style-type: none"> <li>HSBSMB vs. PMB</li> <li>Plant temp: 173.8 vs. 168 °C</li> <li>Pave temp: 152.8 vs. 135 °C</li> <li>Comp temp: 147.2 vs. 128.9 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>HSBSMB: 1.25 + 2.25 + 2.25 inches HSBSMB + 6 inches aggregate base</li> <li>PMB: 1.25 + 2.75 inches PMB + 3 inches base bitumen + 6 inches aggregate base</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>After 22 months and approximately 8.9 million standard axle loads were applied;               <ol style="list-style-type: none"> <li>Neither is cracked;</li> <li>Rut depth: HSBSMB &lt; 3 mm, PMB &lt; 7 mm.</li> </ol> </li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>2004: Section 1;</li> <li>2011: Section 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>S1: Millau Viaduct;</li> <li>S2: Trafficked bus lane in Lyon; France</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>S1: more than 7%</li> <li>S2: more than 5%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>S1: N/A</li> <li>S2: good behavior during lay off and at compaction</li> </ul>	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>S1: maximum strain magnitudes reach <math>500 \cdot 10^{-6}</math> m/m; high fatigue resistance;</li> <li>S2: good surface texture; one month later, behavior is quite well.</li> <li>4 years later;               <ol style="list-style-type: none"> <li>Rutting depth difference between HSBSMB and PMB is not obvious;</li> <li>6% SBS section has the lowest longitudinal and fatigue cracking, and changes little from year 1<sup>st</sup> to year 4<sup>th</sup>;</li> <li>No raveling.</li> </ol> </li> </ul>
4	2012	Taiwan, China	0% - 3% - 6%	N/A	10 cm wearing course + 10 cm binder course + 10 cm bitumen base course + 30 cm aggregate base	<ul style="list-style-type: none"> <li>4 years later;               <ol style="list-style-type: none"> <li>Rutting depth difference between HSBSMB and PMB is not obvious;</li> <li>6% SBS section has the lowest longitudinal and fatigue cracking, and changes little from year 1<sup>st</sup> to year 4<sup>th</sup>;</li> <li>No raveling.</li> </ol> </li> </ul>
5	2011	<ul style="list-style-type: none"> <li>1: New Hampshire Route 202,</li> <li>2: Vermont US-7, USA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1: 7.5% SBS + 25% RAP</li> <li>2: 7.5% SBS, and 7.5% SBS + 25% RAP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1: Mixing temp: 171 °C, comp temp: 149 °C;</li> <li>2: Mixing temp: 155 - 177 °C, comp temp: 144 - 154 °C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1: Pave 1-inch HSBSMB mixture on poor and no milling of old pavement;</li> <li>2: Pave 7-inch HSBSMB mixture on the treated pavement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1: After 2 years, performing well, less cracking, transverse, and fatigue;</li> <li>2: After 2 years, no apparent distress of HSBSMB with or without RAP.</li> <li>1. The ride number is 4.43;</li> <li>2. Noise is 100.7 dB, quieter than the existing pavement.</li> </ul>
6	2013	New Hampshire, USA	7.5% SBS + 17% RAP	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. The ride number is 4.43;</li> <li>2. Noise is 100.7 dB, quieter than the existing pavement.</li> </ul>
7	2021	3 Sections Florida, USA	<ul style="list-style-type: none"> <li>HSBSMB: 7.5%</li> <li>PMB: N/A, PG 76-22</li> </ul>	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>S1: 76 mm PMB (5.1% binder content);</li> <li>S2: 76 mm HSBSMB (5.1% binder content);</li> <li>S3: 76 mm HSBSMB (5.6% binder content);</li> <li>The lower layers of both three are the same: 254 mm lime rock base + 305 mm stabilized subgrade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heavy vehicle simulator loading;               <ol style="list-style-type: none"> <li>After 100,000 HVS passes, rut depth at 50 °C are 5.1, 2.7, and 3.0 mm for S1, S2, and S3.</li> <li>No fatigue damage even after 400,000 cycles,</li> <li>Predicted fatigue lives of the S2 and S3 were 3.5 and 2.3 times greater than that of S1</li> </ol> </li> </ul>

Tab.1.3 – Progetti eseguiti con l'impiego di HSBSMB [7]

### 1.2.7 Sfide nell'uso di HPMB

Quando si introduce un materiale nuovo nel settore delle costruzioni come la costruzione di strade vanno sempre considerati i margini di profitto, le regole di approvvigionamento, la costruzione e il trasporto e devono essere messi in prospettiva rispetto ai potenziali vantaggi come, ad esempio, la riduzione dell'impatto ambientale. Le infrastrutture stradali sono per lo più un bene comune e le sue carenze possono avere conseguenze elevate per la mobilità personale, sicurezza pubblica e logistica dei trasporti. I rischi associati alla sostituzione di materiali che non sono stati ancora testati per le loro prestazioni a lungo termine sono complessi [7].

- i. *Costi a breve e lungo termine*: il passaggio da PMB a HPMB include il raddoppio del contenuto di polimero SBS all'interno del bitume. Questo provoca un aumento dei costi a breve termine (materiali) che dovrebbe essere compensato da vantaggi

economici a lungo termine, come la risoluzione delle esigenze di manutenzione. Inoltre, la ricerca ha indicato che lo spessore degli strati della pavimentazione con HPMB può essere diminuito a parità di durata, riducendo così il consumo di materiali non rinnovabili. Sarebbe necessaria un'estensione delle banche dati e dei modelli previsionali affinché gli strumenti di Life Cycle assessment (LCA) siano in grado di prendere in considerazione questi materiali e, in quanto tali, siano in grado di bilanciare i costi a breve e a lungo termine ed includere considerazioni ambientali.

- ii. *Realtà costruttive*: la lavorabilità è la chiave per la costruzione di una pavimentazione e, in una certa misura, è influenzata principalmente dalla viscosità del bitume. L'HPMB si comporta elasticamente e si muove lentamente durante la compattazione, il che potrebbe richiedere un aumento della compattazione.
- iii. *Breve durata di conservazione*: la stabilità allo stoccaggio dei bitumi modificati è sempre una preoccupazione. Essa dipende fortemente dal bitume di base modifica ma anche dalla compatibilità SBS-bitume tal quale.

## ***Capitolo 2 – Materiali***

In questa sezione vengono presentati i materiali utilizzati nel confezionamento delle miscele per la sperimentazione:

- Aggregati di riciclo (RAP) non frazionati 0/14;
- Aggregati vergini: Sabbia 0/4 , Pietrisco 6.3/16 e Pietrisco 16/22.4;
- Bitume modificato hard SBS (PMB);
- Bitume ad alto tenore di modifica (HPMB): “HA”, “HO” e “HV”;
- Additivo WMA: Iterlow T.

## ***2.1 Aggregati di riciclo (RAP)***

Gli aggregati di riciclo sono ottenuti dalla fresatura di pavimentazioni esistenti (Reclaimed asphalt pavement, RAP). Il fresato è reperibile in diverse granulometrie e, in relazione allo strato di pavimentazione da cui viene ricavato e quindi alla tipologia di conglomerato, può essere costituito da bitume tradizionale o modificato.

### ***2.1.1 RAP 0/14***

Il RAP impiegato nella presente sperimentazione è un fresato non frazionato 0/14 (Fig. 2.1) e la sua massa volumica è pari a  $2,667 \text{ g/cm}^3$ . Inoltre, la percentuale di impiego è la massima prevista dal Capitolato ASPI per il confezionamento di miscele per strati di base (30% in peso rispetto agli aggregati). La caratterizzazione del materiale è stata svolta attraverso la prova di analisi granulometrica (Tab. 2.1) descritta nella normativa UNI EN 933-1 [12] da cui è stata ricavata la relativa curva granulometrica (Fig. 2.2).



*Fig. 2.1: RAP non frazionato 0/14*

RAP 0/14			
apertura setacci	trattenuto		passante
d (mm)	parziale (%)	totale (%)	totale (%)
31,5	0	0	100
20	0	0	100
14	6,0	6,0	94,0
10	19,9	25,9	74,1
6,3	20,6	46,5	53,5
2	22,1	68,6	31,4
0,5	12,1	80,7	19,3
0,25	8,2	88,9	11,1
0,063	1,6	90,5	9,5
filler (<0,063)	8,5	100	0
totale	100		

Tab. 2.1: Analisi granulometrica RAP non frazionato 0/14

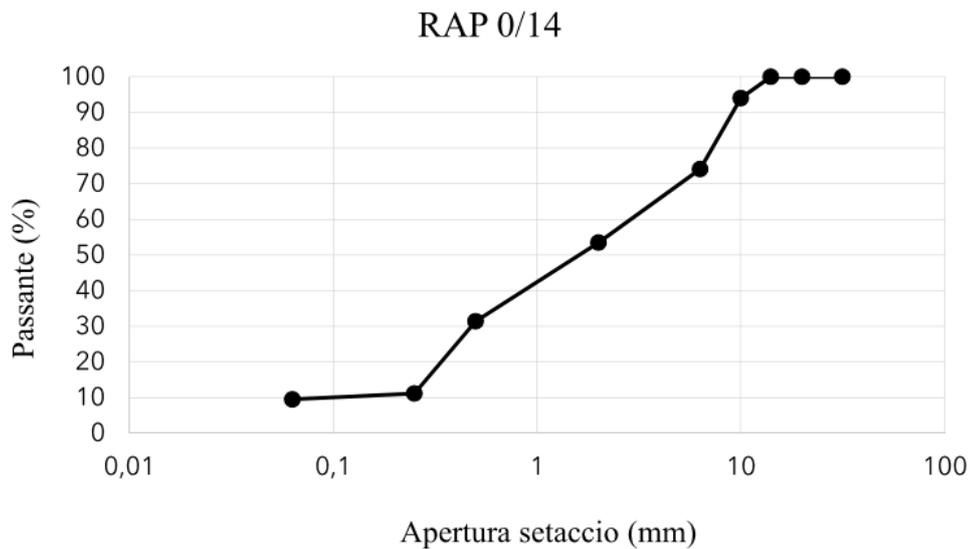


Fig. 2.2: Curva granulometrica RAP non frazionato 0/14

## 2.2 Aggregati vergini

Gli aggregati vergini sono materiali ricavati da rocce mediante un processo di frantumazione artificiale ed una successiva vagliatura. Le rocce, in relazione all'origine possono essere di tre tipologie: ignee, sedimentarie o metamorfiche. Nella presente sperimentazione sono stati utilizzati aggregati lapidei naturali di origine calcarea in diverse pezzature (sabbia 0/4, pietrisco 6.3/16, pietrisco 16/22.4).

### 2.2.1 Sabbia 0/4

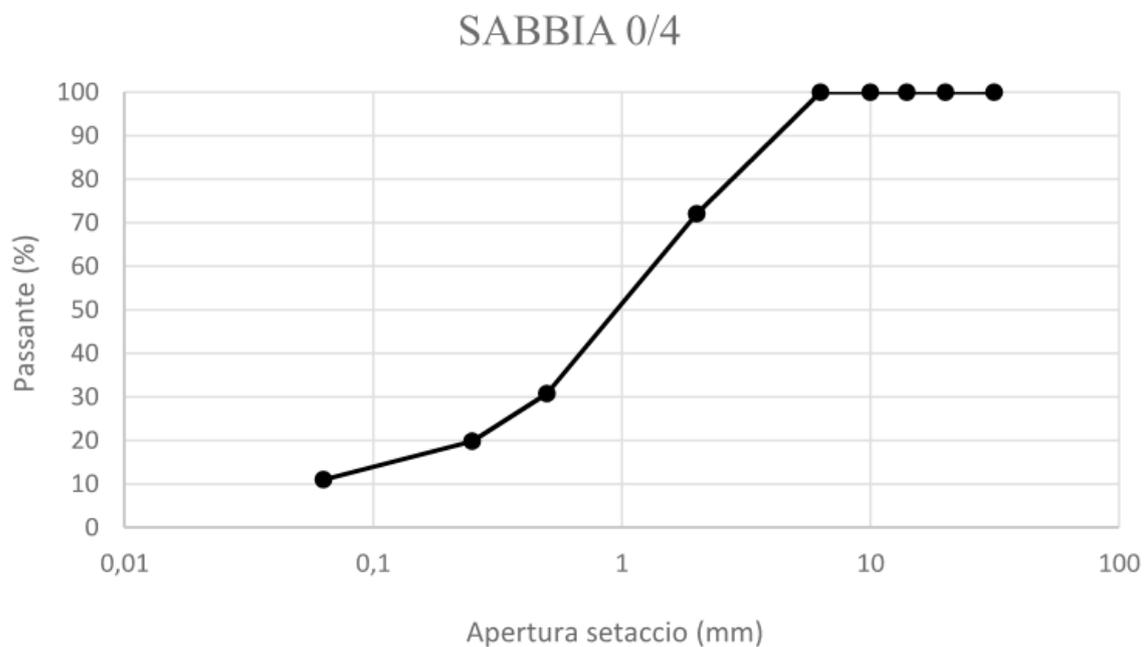
La sabbia (Fig. 2.3) utilizzata per la realizzazione delle miscele oggetto di studio è di tipo naturale e proviene dalla cava 4P. La sua massa volumica è pari a  $2,488 \text{ g/cm}^3$ .



Fig. 2.3: Sabbia 0/4

SABBIA 0/4			
apertura setaccio	trattenuto		passante
d (mm)	parziale (%)	totale (%)	totale (%)
31,5	0	0	100
20	0	0	100
14	0	0	100
10	0	0	100
6,3	0	0	100
2	27,9	27,9	72,1
0,5	41,3	69,2	30,8
0,25	11,0	80,2	19,8
0,063	8,8	89,0	11,0
filler (<0,063)	11,0	100	0
totale	100		

Tab. 2.2: Analisi granulometrica Sabbia 0/4



*Fig. 2.4: Curva granulometrica Sabbia 0/4*

### **2.2.2 Pietrisco 6.3/16**

Il pietrisco 6.3/16 (Fig. 2.5) proviene sempre dalla cava 4P e la sua massa volumica è pari a 2,579 g/cm<sup>3</sup>.



*Fig. 2.5: Pietrisco 6.3/16*

PIETRISCO 6.3/16			
apertura setaccio	trattenuto		passante
d (mm)	parziale (%)	totale (%)	totale (%)
31,5	0	0	100
20	0	0	100
14	7,8	7,8	92,2
10	32,8	40,6	59,4
6,3	52,6	93,2	6,8
2	6,0	99,2	0,8
0,5	0	99,2	0,8
0,25	0	99,2	0,8
0,063	0	99,2	0,8
filler (<0,063)	0,8	100	0
totale	100		

Tab. 2.3: Analisi granulometrica Pietrisco 6.3/16

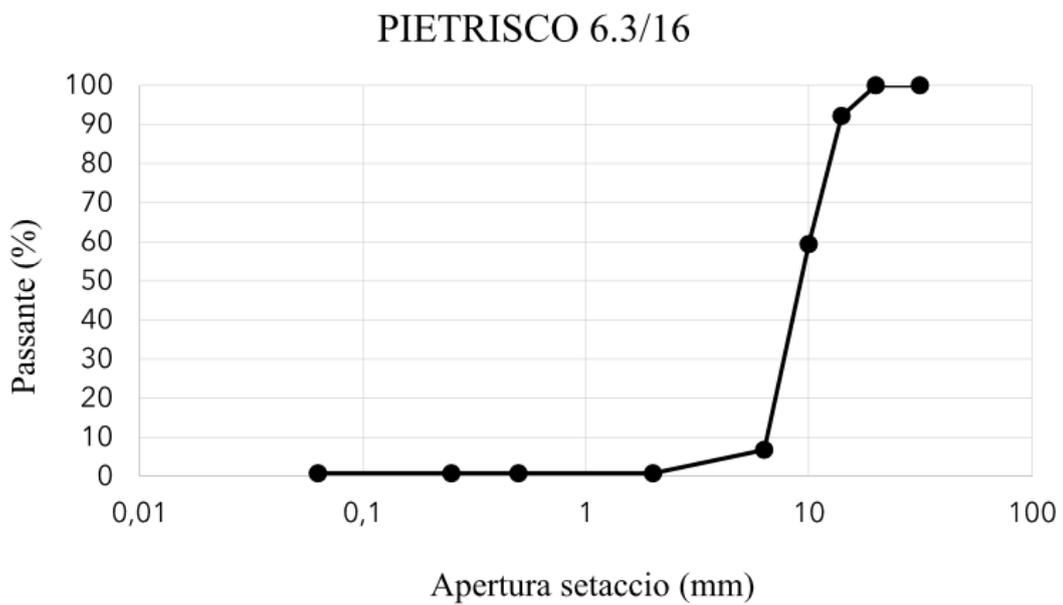


Fig. 2.6: Curva granulometrica Pietrisco 6.3/16

### 2.2.3 Pietrisco 16/22.4

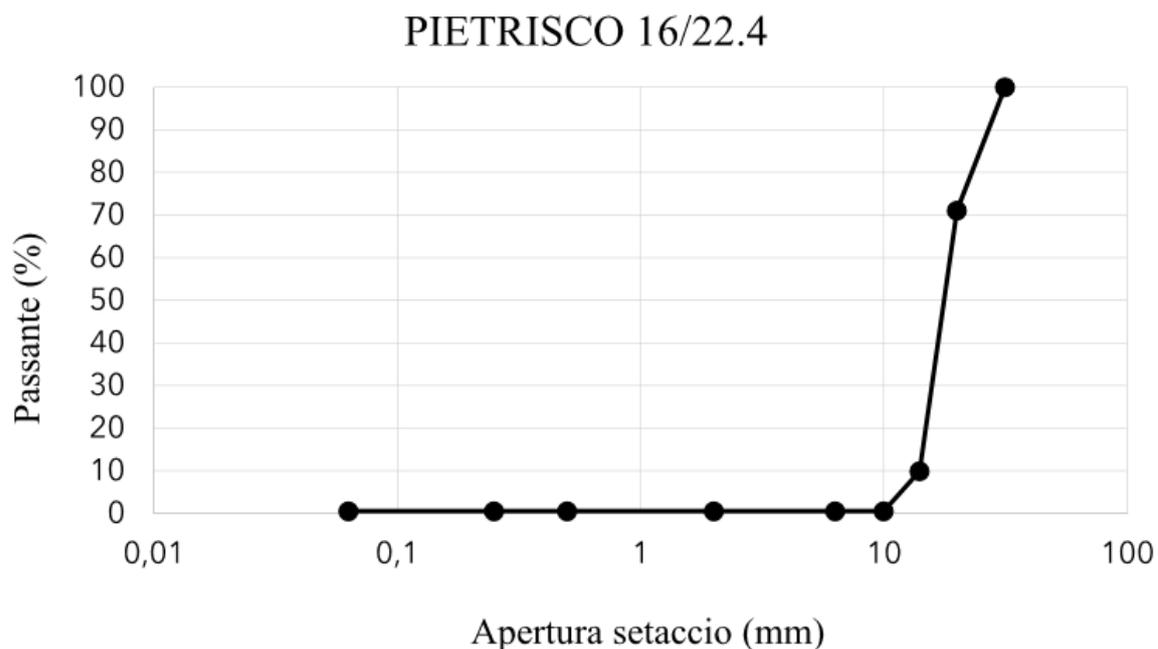
Il pietrisco 16/22.4 (Fig. 2.7) proviene dalla cava Marocca di Anagni (FR) e presenta massa volumica pari a 2,769 g/cm<sup>3</sup>.



*Fig. 2.7: Pietrisco 16/22.4*

PIETRISCO 16/22.4			
apertura setaccio	trattenuto		passante
d (mm)	parziale (%)	totale (%)	totale (%)
31,5	0	0	100
20	29,0	29,0	71,0
14	61,1	90,1	9,9
10	9,4	99,5	0,5
6,3	0	99,5	0,5
2	0	99,5	0,5
0,5	0	99,5	0,5
0,25	0	99,5	0,5
0,063	0	99,5	0,5
filler (<0,063)	0,5	100	0
totale	100		

*Tab. 2.4: Analisi granulometrica Pietrisco 16/22.4*



*Fig. 2.7: Curva granulometrica Pietrisco 16/22.4*

### ***2.3 Bitume modificato hard SBS (PMB)***

Il bitume di riferimento, che risulta attualmente il più utilizzato in ambito autostradale in Italia, è un bitume B50/70 modificato ‘hard’ con 3.8% di polimeri elastomerici di tipo SBS (Styrene-Butadiene-Styrene). Nel seguito, esso è denominato PMB. Le specifiche tecniche del legante di riferimento della presente sperimentazione sono riportate in Tabella 2.5.

PMB HARD (3.8% SBS)		
Penetrazione	dmm	50-70
Rammollimento	°C	43-51
Viscosità 160 °C	Pa * s	0.43

*Tab. 2.5: Dati tecnici PMB HARD*

## **2.4 Bitume ad alto tenore di modifica (HPMB)**

Se il polimero è aggiunto in alte percentuali al legante ( $> 5\%$ ) si parla di bitume ad alto tenore di modifica. In tal caso si osserva una fase continua di polimero. I bitumi selezionati per il confezionamento di miscele nella presente sperimentazione sono:

- HPMB “HA”
- HPMB “HO”
- HPMB “HV”

### **2.4.1 HPMB “HA”**

Il Bitume super-modificato “HA” è prodotto in Italia ed è un materiale ancora in fase di sviluppo industriale. Le specifiche fornite dall’azienda produttrice sono riportate in tabella 2.6.

HPMB “HA” (7.5% SBS)		
Penetrazione	dmm	52
Rammollimento	°C	74.1
Viscosità 160 °C	Pa * s	0.43

*Tab. 2.6: Dati tecnici HPMB HA*

### **2.4.2 HPMB “HO”**

Il bitume “HO” è un bitume ad alto tenore di modifica (7.5% di SBS) prodotto in Polonia e disponibile sul mercato. Le specifiche tecniche sono illustrate in tabella 2.7.

HPMB “HO” (7.5% SBS)		
Penetrazione	dmm	45-80
Rammollimento	°C	80
Viscosità 160 °C	Pa * s	0.53

*Tab. 2.7: Dati tecnici HPMB HO*

### **2.4.3 HPMB “HV”**

Il bitume super-modificato “HV” è un bitume prodotto in Italia ad alto contenuto di polimeri per pavimentazioni a elevate prestazioni sia in ambito stradale che aeroportuale, attualmente disponibile sul mercato. Seguono le specifiche tecniche (Fig. 2.8).

HPMB “HV” (9.0% SBS)		
Penetrazione	dmm	45-80
Rammollimento	°C	90
Viscosità 160 °C	Pa * s	0.60

*Tab. 2.8: Dati tecnici HPMB HV*

### **2.5 Additivo Iterlow T**

Iterlow T è un additivo chimico per conglomerati bituminosi tiepidi. Esso permette di diminuire la temperatura nelle fasi di produzione, stesa e compattazione di circa 40°C e allo stesso tempo contribuisce come promotore di adesione. La produzione a temperature ridotte

permette un risparmio significativo di energia spesa e una riduzione delle emissioni atmosferiche. Inoltre, questo additivo è adatto anche per la produzione di miscele hot in condizioni di basse temperature ambientali (anche sotto 5°C) e per trasporti di lunga distanza.

Il dosaggio è, di solito, di 0.2 – 0.5% sul peso del bitume totale. Le proprietà dell’additivo sono riportate in tabella 2.9.

Aspetto	Liquido
Colore	Giallo - Marrone
Densità a 25°C	0.95 - 1.05 g/cm <sup>3</sup>
Viscosità a 25°C	150 - 250 cP
Flash point	≥ 105°C
Pour point	≤ -5°C

*Tab. 2.9: Proprietà tecniche Iterlow T*

Nella presente sperimentazione è stato usato un dosaggio di 0.5% di additivo sul peso del bitume totale sia per la miscela di riferimento che per le miscele con bitume ad alto tenore di modifica. Durante le prove di laboratorio è stato effettuato un tentativo di confezionamento di miscela con Bitume HPMB “HA” con 0.80% di additivo sul peso del bitume totale, anche se fuori range di applicazione.

### ***Capitolo 3 - Programma sperimentale***

In questo capitolo si illustra l’obiettivo della sperimentazione, le miscele di progetto, le procedure di laboratorio, il confezionamento dei provini.

#### ***3.1 Obiettivo della sperimentazione***

L’obiettivo principale di questo lavoro di tesi sperimentale è lo studio eseguito mediante prove di laboratorio su un’unica miscela di conglomerato bituminoso tiepido per strati di base autostradale, con differenti tipologie di bitume (PMB, HPMB “HA”, HPMB “HO”, HPMB “HV”). Per il confronto sono state eseguite valutazioni di compattabilità CEI, prove

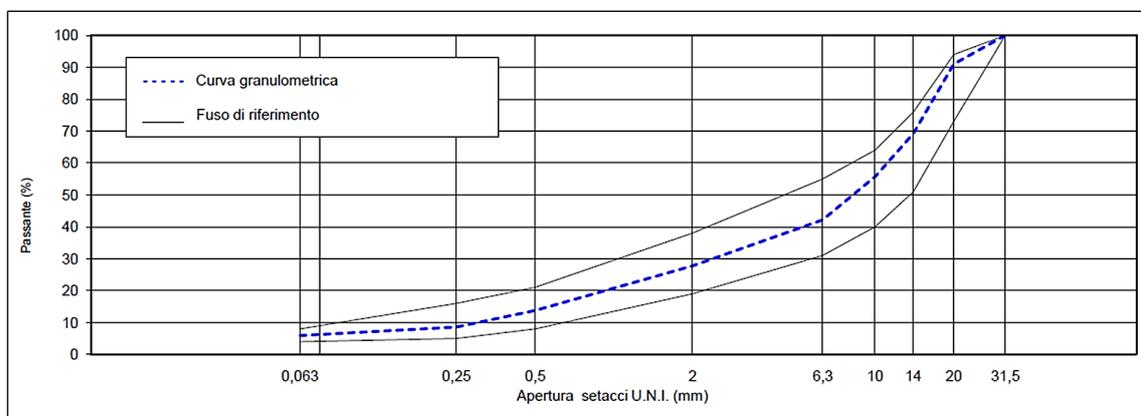
di rottura a trazione indiretta, prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta e prova di rottura a fatica a trazione indiretta.

### 3.2 Mix design

La composizione granulometrica usata nelle diverse miscele è:

- Pietrisco 16/22.4 in quantità pari al 31% in peso della miscela;
- Pietrisco 6.3/16 in quantità pari al 14% in peso della miscela;
- Sabbia 0/4 in quantità pari al 25% in peso della miscela;
- Rap 0/14 in quantità pari al 30% in peso della miscela.

La curva granulometrica di progetto (Fig. 3.1) è stata determinata in modo da risultare contenuta all'interno dei Fusi di riferimento forniti da Capitolato Autostrade per l'Italia ed è inoltre identica a quella fornita e utilizzata da "Amplia Infrastructures".



*Fig. 3.1 – Curva granulometrica mix-design Amplia Infrastructures (Base Ric. 30%) e fuso granulometrico Capitolato Autostrade per l'Italia*

Il contenuto totale del bitume è 4.3%. Il fresato è stato sottoposto a prove di estrazione del bitume invecchiato residuo. Il contenuto di bitume riferito al peso degli aggregati è risultato pari al 5,16 % in massa. Una volta ricavata la percentuale di bitume contenuta nel fresato e considerando che la percentuale di impiego di quest'ultimo è del 30%, è stata determinata

l'esatta quantità di bitume vergine da aggiungere durante la miscelazione al fine di ottenere il contenuto ottimale di legante (previsto dal Mix Design):

$$\% \text{ bitume contenuta nel fresato} = 0,30 \cdot 5,16\% = 1,55\%$$

$$\% \text{ bitume vergine} = 4,30\% - 1,5\% = 2,75\%$$

Nel Mix Design di riferimento è presente, come già specificato, un aggregato di riciclo RAP 0/14 e pertanto nel calcolo della percentuale di additivo sul bitume totale va considerato anche il bitume in esso contenuto. A seconda della percentuale di additivo sul peso del bitume totale che si vuole ottenere, si devono dosare diverse percentuali di additivo rispetto al peso del bitume vergine:

- **0.50% di additivo sul bitume totale:**

$$\rightarrow \% \text{ additivo bitume vergine} = \frac{\% \text{ bitume totale}}{\% \text{ bitume vergine}} \cdot \% \text{ di additivo bitume totale} = \frac{4.3}{2.75} \cdot 0.50 = 0.78\%$$

- **0.80% di additivo sul bitume totale:**

$$\rightarrow \% \text{ additivo bitume vergine} = \frac{\% \text{ bitume totale}}{\% \text{ bitume vergine}} \cdot \% \text{ di additivo bitume totale} = \frac{4.3}{2.75} \cdot 0.80 = 1.25\%$$

Il Mix design è definito nella tabella 3.1.

<b>Piestriscio 16/22,4</b>	2.769	31	0.858
<b>Piestriscio 6,3/16</b>	2.579	14	0.361
<b>Sabbia 0/4</b>	2.488	25	0.622
<b>RAP 0/14</b>	2.667	30	0.800
		<b>MVA Mix</b>	2.642
<b>Bit. aggiunto (agg)</b>	<b>[%]</b>	2.75	
<b>Bit. estrazione 0/14 (agg)</b>	<b>[%]</b>		5.16
<b>Bit. da 0/14 (agg)</b>	<b>[%]</b>	1.5	
<b>Bit. totale (agg)</b>	<b>[%]</b>	<b>4.3</b>	
<b>Bit. totale (mix)</b>	<b>[%]</b>	4.12	
<b>Massa Volumica Bitume</b>	<b>[g/cm<sup>3</sup>]</b>	1.026	
<b>Agg. totale (mix)</b>	<b>[%]</b>	95.9	
<b>Massa Volumica Max (Matematica) [g/cm<sup>3</sup>]</b>		<b>2.481</b>	

Tab. 3.1 – Mix design comune a tutte le miscele

In funzione della tipologia di bitume e della percentuale di additivo, le miscele sono state codificate come segue:

- **DG\_P\_130\_0.5**
- **DG\_HA\_130\_0.5**
- **DG\_HA\_130\_0.8**
- **DG\_HO\_130\_0.5**
- **DG\_HV\_130\_0.5**

La codifica segue tali assunzioni:

- 1) La prima parte (DG) indica “dense-graded”
- 2) La seconda indica il tipo di bitume: P(PMB), HA(HPMB), HO(HPMB), HV(HPMB)
- 3) La terza indica la temperatura di miscelazione

4) La quarta indica il dosaggio di additivo sul bitume totale

La codifica del singolo provino si può esprimere, ad esempio, per il provino n°2 della miscela dense-graded con bitume PMB con temperatura di miscelazione 130°C e percentuale di additivo di 0.5% sul bitume totale come: **DG\_P\_130\_0.5\_2**.

### ***3.3 Apparecchiature e protocolli di prova***

In questa sezione si presentano le metodologie di prova e le strumentazioni utilizzate durante l'attività sperimentale.

#### ***3.3.1 Analisi granulometrica***

Per la determinazione della distribuzione granulometrica di un aggregato si ricorre alla separazione mediante setacciatura con stacci di diversa luce di maglia ottenendo i pesi delle singole frazioni granulometriche. Questi, espressi percentualmente rispetto al peso di tutto il campione analizzato, consentono di calcolare il materiale passante a ogni staccio. Riportando in un grafico il materiale passante in funzione dell'apertura (d) del vaglio, si costruisce la cosiddetta "curva granulometrica" del singolo aggregato. Tale procedura è descritta dalla normativa UNI EN 933-1 [12].

Inizialmente avviene la rimozione del passante al setaccio da 0,063 mm per "ripulire" il materiale grosso dal filler attaccato. L'operazione si rende necessaria per evitare la sovrastima della pezzatura più grande rispetto al passante al setaccio da 0,063 mm. Successivamente si dispone una pila di setacci a maglie quadrate (Fig. 3.2), chiamati stacci, con dimensioni decrescenti dall'alto verso il basso. Le aperture dei setacci sono di: 31,5; 20; 16; 10; 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,063 mm. Una quantità nota di campione viene posta sulla sommità della pila di setacci comprensiva di fondo e quest'ultima viene posizionata in un vibrovaglio (figura 3.3). Questa apparecchiatura con un'azione meccanica orizzontale facilita la vagliatura.



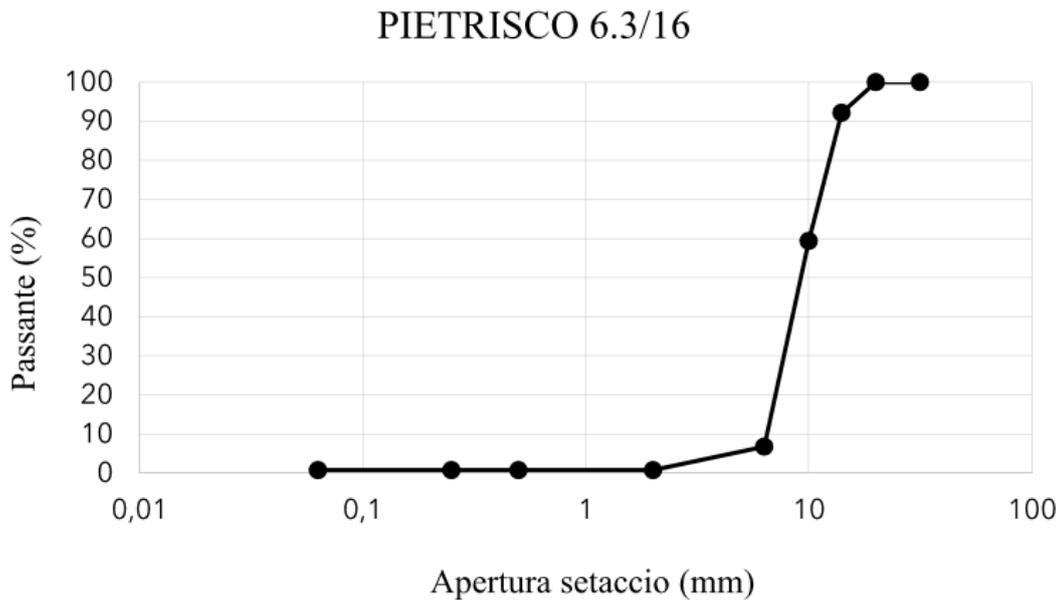
*Fig. 3.2 – Setaccio a maglia quadrata*



*Fig. 3.3 – Vibrovaglio*

A questo punto si pesa la porzione di terreno trattenuta da ciascun setaccio e successivamente, conoscendo il peso iniziale del campione, si determina la percentuale di materiale che passa per un setaccio con un certo diametro.

Infine i risultati dell'analisi granulometrica possono essere graficati mediante una curva granulometrica (figura 3.4), grafico nel quale si riportano sull'asse delle ordinate i valori dei passanti cumulativi in scala aritmetica e sull'asse delle ascisse le dimensioni delle aperture dei setacci in scala logaritmica.



*Figura 3.4: Esempio di curva granulometrica Pietrisco 6.3/16*

### **3.3.2 Miscelazione**

Quando gli aggregati arrivano in laboratorio vengono inseriti in forno a 110°C affinché risultino completamente privi di acqua.

Gli inerti vergini e di recupero vengono pesati e posizionati quindi in teglie, il bitume viene pesato e lasciato nel suo contenitore. Prima di procedere alla miscelazione: gli inerti vergini vengono messi in forno alla temperatura di 140°C per 3 ore, il bitume viene messo in forno a 170°C per 2 ore e 30 minuti nel caso di PMB e a 190°C per 3 ore per i super-modificati.

Per la miscelazione, che avviene a 130°C, viene utilizzato un miscelatore meccanico (Fig. 3.5).



*Fig. 3.5 – Miscelatore meccanico*

La miscelazione segue le seguenti fasi:

- Inserimento di aggregati di recupero e vergini e attivazione della miscelazione per 30 secondi;
- Inserimento di bitume con additivo WMA (Iterlow T) tramite miscelatore (Fig. 3.6) e attivazione della miscelazione per 120 secondi;



*Fig. 3.6 – Miscelatore per additivare il bitume*

- Apertura del miscelatore per un controllo speditivo sul grado di miscelazione ottenuto e ulteriore miscelazione per 180 secondi.

Al termine della miscelazione si apre il coperchio del macchinario e si divide il materiale per il confezionamento dei provini. Una volta effettuato il porzionamento, prima della compattazione, le miscele vengono mantenute in forno alla temperatura di 120°C per circa un'ora. Trascorso questo tempo si procede alla compattazione.

### ***3.3.3 Compattazione e preparazione dei provini***

La pressa a taglio girevole è un'apparecchiatura impiegata per il confezionamento dei provini cilindrici in conglomerato bituminoso (figura 3.7).



*Fig. 3.7 – Pressa giratoria Gyrocomp*

Questa è costituita da un telaio di carico dove, nella parte superiore è presente il pistone che imprime al materiale presente nella fustella (Fig. 3.8) una pressione costante di 600 kPa. Nella parte inferiore è presente una base che ruota a 30 rpm ed è inclinata di 1,25°, permettendo così la generazione di sollecitazioni tangenziali necessarie all'addensamento del provino.

Al di sopra della base rotante, viene adagiata la fustella metallica (diametro 150 mm) dove va inserito il conglomerato bituminoso. La fustella in questione è costituita da: un tappo metallico inferiore con uno spessore di 48 mm e una piastra metallica superiore, che consente di poter imprimere una pressione omogenea sul materiale attraverso il pistone di carico.





*Fig. 3.10 – Configurazione pressa giratoria a giri imposti*

Inizialmente si posiziona un disco di carta sul fondo della fustella per evitare l'adesione del conglomerato sulla piastra. Si inserisce quindi il materiale per poi adagiare superiormente un altro disco di carta e una piastra. Si adagia poi la fustella nella pressa giratoria (Fig. 3.11), si chiude lo sportello e si aziona il macchinario. Il software registra ad ogni giro l'altezza del provino. A fine compattazione, è possibile estrarre il provino con un'apposita manovella meccanica, che blocca la fustella nella parte inferiore e spinge il provino verso l'alto. Una volta estratto il provino (Fig. 3.12) si rimuovono entrambi i dischi di carta preventivamente posizionati.



*Fig. 3.11 – Fustella nella pressa giratoria*



*Fig. 3.12 – Provino estratto dalla fustella*

Nella sperimentazione, per ogni miscela, sono stati prodotte due tipologie di provini:

- Giri imposti (120 giri), massa provino 4500 g (Fig. 3.13) per la valutazione dell'indice CEI. Questi vengono poi tagliati orizzontalmente a metà (Fig. 3.14) per poi essere testati a rottura a trazione indiretta (ITS):

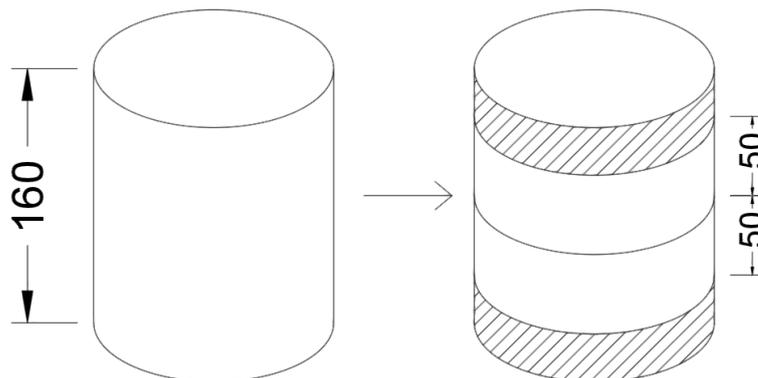


*Fig. 3.13 – Provini compattati a 120 giri prima del taglio*



*Fig. 3.14 – Provini compattati a 120 giri dopo il taglio*

- Altezza imposta (160 mm), massa provino 6594 g (Fig. 3.15 e 3.16) per poi eseguire su di esso 3 tagli orizzontali (Fig. 3.17) ricavando due dischi di altezza 50 mm, scartando le porzioni inferiore e superiore, per la valutazione di ITSM e ITFT:



*Fig. 3.15 – Schema di taglio provini altezza imposta 160 mm*



*Fig. 3.16 – Provini altezza imposta 160 mm prima del taglio*



Fig. 3.17 – Provini altezza imposta 160 mm dopo del taglio

### 3.3.4 Determinazione delle proprietà volumetriche e della compattabilità

Le proprietà volumetriche della miscela influenzano il comportamento meccanico e la durabilità in esercizio del conglomerato bituminoso. Il volume totale della miscela (figura 3.18) è composto da:

- 1) aggregati;
- 2) legante;
- 3) vuoti.

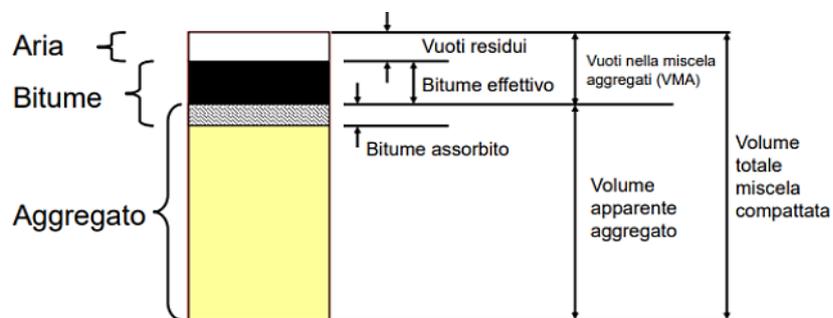


Fig. 3.18 – Componenti della miscela

Nella sperimentazione le proprietà volumetriche dei provini sono state valutate individuando la massa volumica massima, la massa volumica apparente e il volume dei vuoti.

#### **Determinazione della massa volumica massima**

La massa volumica massima è la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela di conglomerato bituminoso sfusa alla temperatura di prova. Tra i metodi proposti

dalla normativa UNI EN 12697-5 [13] nella sperimentazione è stato impiegato quello matematico. La massa volumica massima  $\rho_m$  del conglomerato bituminoso si calcola attraverso la seguente formula:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

dove:

- $\rho_m$  = massa volumica massima della miscela in g/cm<sup>3</sup>;
- $p_a$  = percentuale degli aggregati nella miscela in g/g;
- $\rho_a$  = massa volumica apparente degli aggregati in g/cm<sup>3</sup>;
- $p_b$  = percentuale del legante bituminoso nella miscela in g/g;
- $\rho_b$  = massa volumica del legante bituminoso a 25 °C in g/cm<sup>3</sup>.

### ***Determinazione della massa volumica apparente***

La massa volumica apparente è la massa per volume unitario, inclusi i vuoti d'aria, di un provino ad una prefissata temperatura. Le modalità di prova attraverso le quali è possibile determinare questa grandezza (descritte dalla norma UNI EN 12697-6 [14]) sono quattro: la massa volumica apparente secca ( $\rho_{dry}$ ), con superficie satura asciutta ( $\rho_{SSD}$ ), con provino sigillato ( $\rho_{sea}$ ) e la massa volumica apparente geometrica ( $\rho_{geom}$ ). Le prime tre procedure consistono nel pesare il campione in aria e calcolarne il volume attraverso pesate in acqua (Principio di Archimede). L'ultima, invece, sfrutta esclusivamente le dimensioni note del provino per la determinazione del volume. La procedura impiegata nella presente sperimentazione è la 2.

#### **- procedura SSD (saturated surface dry)**

Operativamente si pesano prima i provini in aria, in modo da determinare la massa a secco  $m_1$  e successivamente si immergono all'interno di un contenitore pieno d'acqua. Trascorsa

un'ora dall'immersione, i provini si inseriscono singolarmente all'interno del cestello (Fig. 3.19) collegato alla bilancia idrostatica e si rileva la massa  $m_2$ .



*Fig. 3.19 – Misurazione della massa in acqua  $m_2$*

In seguito, al fine di ottenere la massa umida del campione ( $m_3$ ) si estrae il provino dall'acqua e lo si pesa nuovamente previa asciugatura della superficie esterna con un panno.

Infine, si calcola la massa volumica apparente con superficie satura asciutta:

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

Dove:

- $\rho_{SSD}$  = massa volumica apparente con superficie satura asciutta [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];
- $m_1$  = massa del provino asciutto [g];
- $m_2$  = massa del provino in acqua (dopo immersione di un'ora) [g];
- $m_3$  = massa del provino in condizioni SSD [g];

- $\rho_w$  = densità dell'acqua alla temperatura di prova T, calcolata mediante la seguente formula:  $\rho_w = 1,00016584 - 0,000793 \cdot T - 0,00000529 \cdot T^2$ .

### ***Determinazione del volume dei vuoti***

Il volume dei vuoti dei provini compattati con la pressa a taglio giratoria, in accordo con la normativa UNI EN 12697-8 [15], è stato definito in funzione della massa volumica apparente geometrica e della massa volumica massima con la formula di seguito riportata:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- $V_m$  = contenuto di vuoti d'aria;
- $\rho_m$  = massa volumica massima [g/cm<sup>3</sup>];
- $\rho_b$  = massa volumica apparente [g/cm<sup>3</sup>].

### ***Determinazione della compattabilità***

In laboratorio è stato effettuato lo studio della compattabilità determinando il Compaction Energy Index (CEI). Questo indice rappresenta l'energia trasferita dai rulli in sito per compattare la miscela alla densità richiesta, prima dell'apertura al traffico. Per il calcolo dell'indice CEI viene determinata l'area sottesa alla curva di compattazione (Fig. 3.20) a partire dall'ottava rotazione (selezionata per simulare l'azione del banco di stesa di una tipica macchina vibrofinitrice durante le operazioni di stesa), fino alla fine della curva (92%  $\gamma_m$ ) per le miscele chiuse. Il limite superiore (92%  $\gamma_m$ ) rappresenta la densità raggiunta al termine della costruzione della pavimentazione, prima che venga aperta al transito e subisca un ulteriore addensamento dovuto ai carichi del traffico. Si preferiscono miscele con bassi valori di CEI, in quanto mostrano migliori caratteristiche di compattabilità (minor sforzo ed energia di compattazione richiesti); allo stesso tempo, valori troppo ridotti dell'indice di compattabilità sono da evitarsi in quanto potrebbero caratterizzare miscele troppo "soffici".

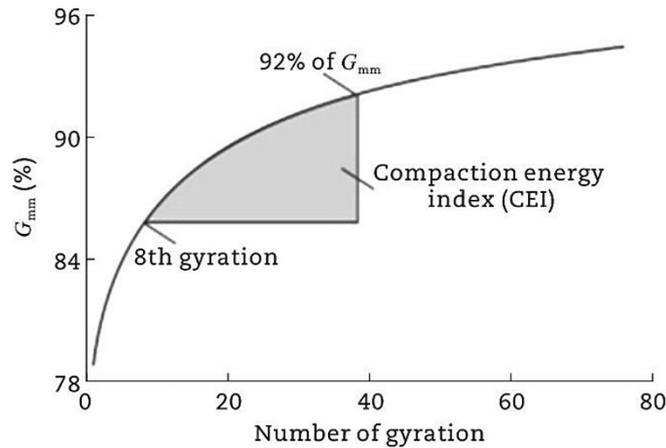


Fig. 3.20 – Definizione indice CEI

### 3.3.5 Condizionamento dei provini

Prima di eseguire le prove i provini sono stati opportunamente condizionati per un certo periodo di tempo, sia in condizioni asciutte (dry) che bagnate (wet). Questo risulta essere necessario al fine di valutare l'influenza che ha l'acqua sul conglomerato. In particolare, per ogni miscela sono stati prodotti 6 provini da sottoporre alla prova di trazione indiretta e 12 provini da sottoporre alle prove di modulo ITSM e di fatica ITFT. I provini da sottoporre alle prove di modulo e di fatica vengono condizionati in camera climatica a 20°C. Dei 6 provini da sottoporre a prove ITS, 3 provini sono stati sottoposti a condizionamento wet e 3 provini a condizionamento dry.

#### - condizionamento wet

Il condizionamento wet consiste nel condizionare i provini in acqua per un certo periodo di tempo e ad una determinata temperatura. Questi fattori vengono imposti dalla normativa di riferimento [18] e, nel caso in questione, i provini sono stati tenuti in acqua per circa 72 ore ad una temperatura di 40°C. I provini vengono inseriti nel bagno termostatico con acqua, in quantità tale da ricoprire completamente i campioni. Una volta inseriti i provini, viene impostata la temperatura dell'acqua e viene accesa istantaneamente la pompa, che è necessaria al ricircolo dell'acqua in modo da rendere la temperatura omogenea.

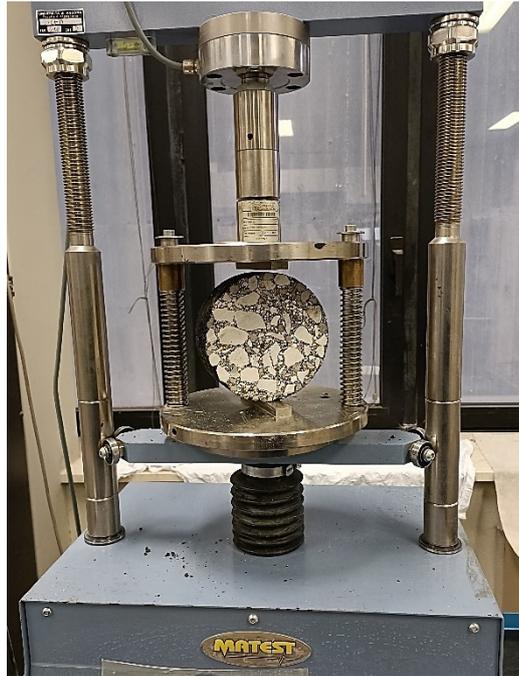
Al termine delle 72 ore, i provini vengono tirati fuori tre ore prima di effettuare le prove. Questo perché, prima di effettuare i test, l'acqua deve essere completamente assente. Poi sono stati inseriti in camera climatica a 25°C.

#### **- condizionamento dry**

Il condizionamento dry, invece, consiste nel mettere i provini in una camera climatica ad una certa temperatura. In questo caso, i provini sono stati condizionati ad una temperatura di 25°C per almeno 3 ore.

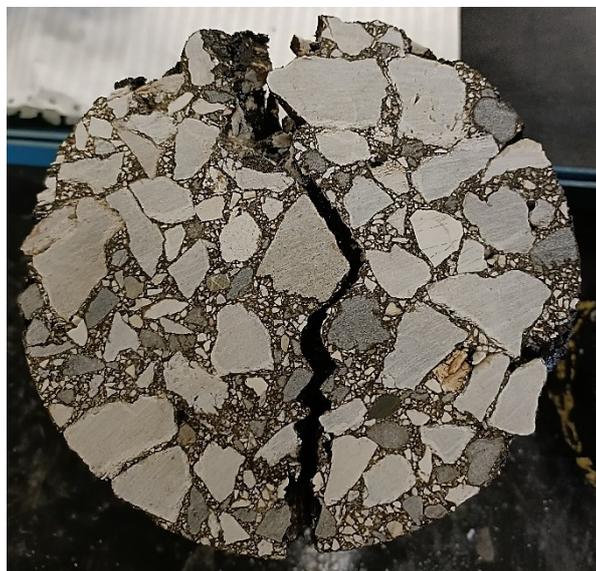
#### ***3.3.6 Prova di rottura a trazione indiretta***

La prova di rottura a trazione indiretta consente di determinare l'ITS (Indirect Tensile Strength), come definito dalla normativa UNI EN 12697-23. Questo parametro indica la massima tensione di trazione che un provino cilindrico è in grado di sopportare. L'ITS è importante per stabilire la qualità e l'accettabilità delle miscele. La prova di trazione indiretta si esegue ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. Nella sperimentazione i provini sono stati condizionati in camera climatica a 25°C. L'apparecchiatura di prova è composta da un sistema di carico dato da due piatti paralleli infinitamente rigidi. Le sollecitazioni sono applicate al materiale tramite due listelli di larghezza  $15 \pm 2$  mm, spessore  $4 \pm 1$  mm e lunghezza maggiore della zona di contatto con il provino. Quest'ultimo è posizionato in modo che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello superiore risulti parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi i listelli siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino (figura 3.21).



*Fig. 3.21 – Posizionamento provino per determinazione ITS*

La testa di carico avanza ad una velocità costante pari a  $50 \pm 2$  mm/min fino a rottura (Fig. 3.22). L'apparecchiatura registra la corsa e il carico.



*Fig. 3.22 – Provino rotto con la prova a trazione indiretta*

Il software UTM II, impostando il diametro del provino, l'altezza, la velocità di avanzamento e il carico di fine prova, individua:

- la curva carico-corsa (Fig. 3.23);
- il carico di rottura a compressione (Pmax).

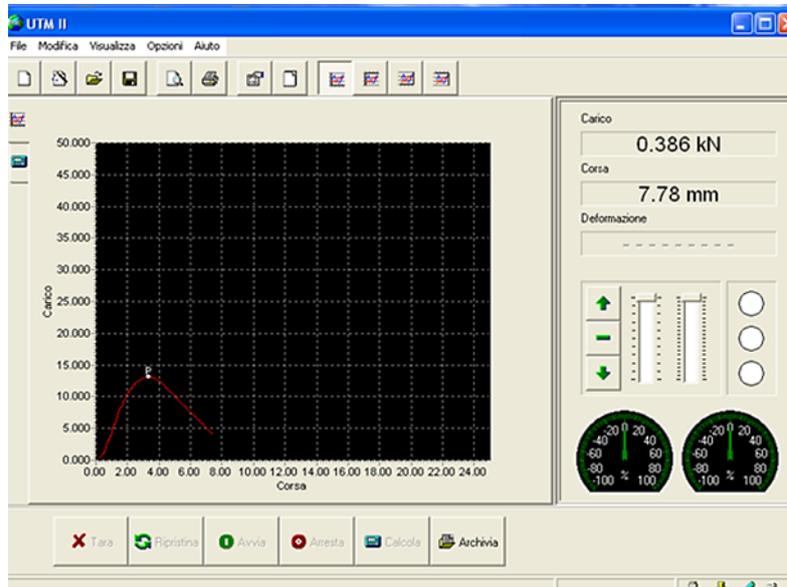


Fig. 3.23 – Curva carico-corsa

La resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, si calcola mediante la seguente espressione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot t \cdot D}$$

dove:

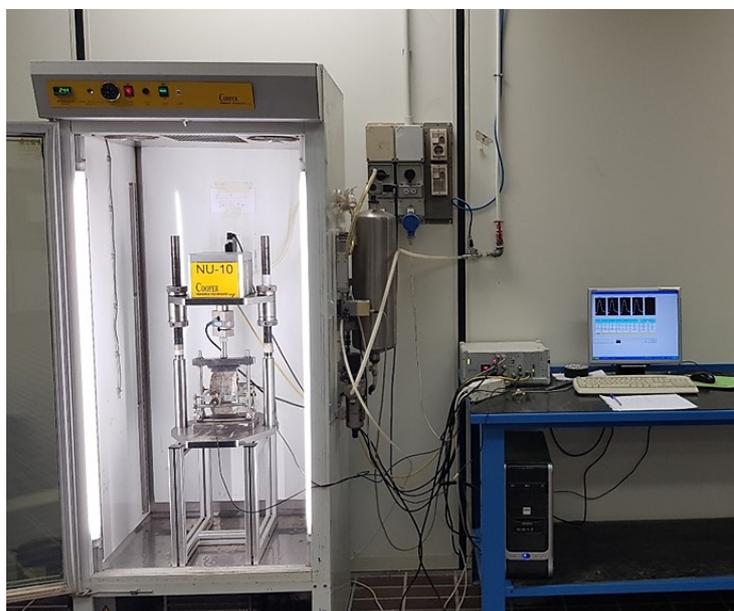
- $P_{\max}$  = il carico massimo in N;
- $t$  = l'altezza del provino in mm;
- $D$  = il diametro del provino in mm

Calcolando i valori medi dell'indice ITS sia wet che dry, è possibile calcolare la suscettività all'acqua dei provini tramite la seguente relazione:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \cdot 100$$

### ***3.3.7 Prova di modulo di rigidità a trazione indiretta***

L'apparecchiatura utilizzata prende il nome di NAT (Nottingham Asphalt Tester) e permette, in accordo con la normativa UNI EN 12697-26 [17], di ricavare il modulo di rigidità a trazione indiretta. Questa apparecchiatura, applicando una serie di sollecitazioni di compressione impulsive lungo il diametro verticale di un provino cilindrico, provoca una deformazione elastica nella direzione ortogonale rispetto a quella del carico. Il NAT (figura 3.24) simula lo stato tensionale e deformativo generato dal passaggio degli pneumatici. Il risultato della prova è l'ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus).



*Fig. 3.24 – Nottingham Asphalt Tester*

Durante l'esecuzione della prova si presuppone che il materiale rimanga in campo elastico e quindi che sia omogeneo e isotropo. Il conglomerato bituminoso ha un comportamento visco-elasto-plastico ma verificandosi le condizioni di prova e nello specifico per temperature inferiori a 25°C il modulo di rigidità a trazione è uguale a quello a compressione e quindi il materiale si comporta come un mezzo elastico lineare.

L'ITSM del campione è di conseguenza funzione della geometria, del carico applicato, della deformazione orizzontale fissata, del coefficiente di Poisson, della temperatura di prova e del tempo di picco.

Il provino nel NAT è sottoposto allo stato di sollecitazione indicato nella figura 3.25.

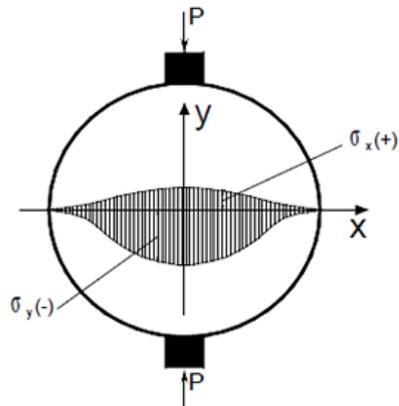


Fig. 3.25 – Stato di sollecitazione indotto sul provino

Le formule che permettono di calcolare le sollecitazioni medie e massime, di trazione in direzione X e di compressione in direzione Y sono le seguenti:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t}, \sigma_{x,\text{media}} = \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_{y,\max} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t}, \sigma_{y,\text{media}} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

dove:

- P = carico applicato;
- d = diametro del provino;
- t = spessore del provino.

Il modulo di rigidezza elastico si esprime come deformazione di un elemento sottoposto ad uno stato biassiale di tensioni. L'espressione della deformazione orizzontale media del provino  $\epsilon_{x,\text{media}}$  è:

$$\epsilon_{x,\text{media}} = \frac{\sigma_{x,\text{media}}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,\text{media}}}{E}$$

in cui:

- $\nu$  = coefficiente di Poisson;
- $E$  = modulo elastico del materiale.

Dalle equazioni precedenti e tenendo presente che la deformazione orizzontale totale  $\Delta$  del provino si calcola moltiplicando  $\varepsilon_{x,media}$  per il diametro del provino, si ha la relazione:

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

Successivamente si ricava il modulo elastico del materiale che risulta pari a:

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

Il carico  $P$  è caratterizzato dai parametri sottoindicati (figura 3.26).

- Peak load: carico massimo applicato ad ogni ciclo
- Pulse repetition period: intervallo temporale tra due impulsi consecutivi
- Rise time: tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il carico massimo

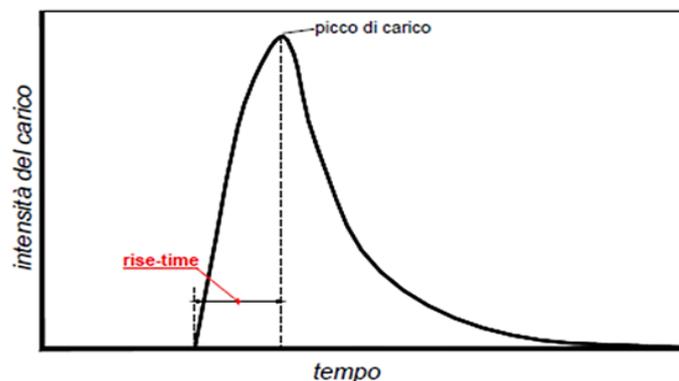


Fig. 3.26 – Parametri caratterizzanti del carico

Il modulo di rigidità viene corretto tramite un fattore  $k$  che si ottiene dividendo l'area sottesa alla curva durante il rise time con il prodotto tra quest'ultimo e il peak load. Quando

questo parametro non è compreso tra 0,50 e 0,70 il modulo di rigidezza assume la seguente espressione:

$$E' = E[1 - 0,322(\log(E) - 1,82)(0,60 - k)]$$

dove:

- $E'$  = modulo di rigidezza corretto in MPa;
- $k$  = fattore correttivo;
- $E$  = modulo di rigidezza misurato in MPa.

Il NAT si compone di una camera climatica per il condizionamento del campione a 20°C, una cella di carico, un pistone e un dispositivo per il posizionamento del provino. La deformazione nella direzione ortogonale rispetto a quella di applicazione del carico si determina con dei trasduttori di spostamento, i quali sono collegati ad un computer per l'acquisizione dei dati. Il castelletto (Fig. 3.27) è lo strumento che consente il corretto montaggio dei trasduttori.

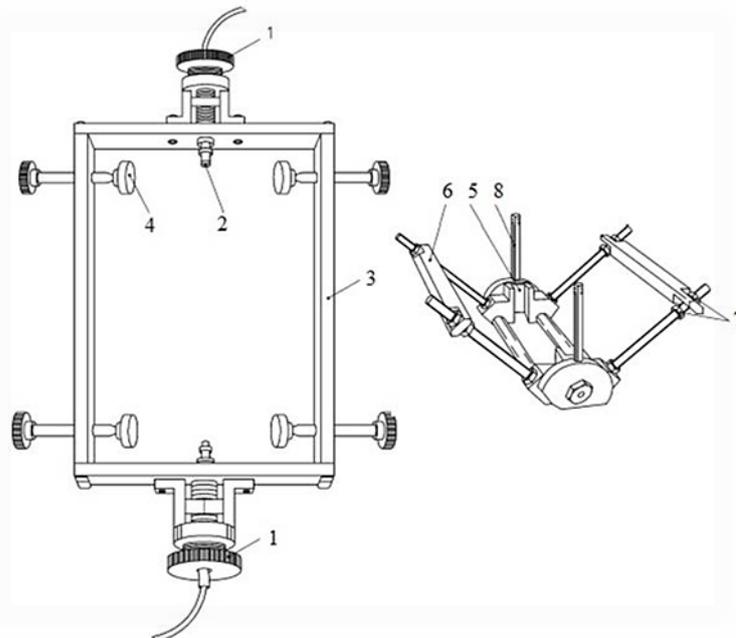


Fig. 3.27 – Castelletto per il posizionamento del provino

Il telaio principale (3) ha la funzione di sostenere il provino, che viene centrato tramite la guida (5) e le viti (4). I trasduttori (2) vengono posizionati nei due fori, messi a contatto con il materiale e fissati con altre viti (1). Affinché il telaio sia in bolla prima viene posto sulle barre di appoggio (6), regolate con ulteriori viti (7), poi si monta il provino sul castelletto e infine si mette una testa di carico. Si inserisce quindi il tutto nel NAT (Fig. 3.28).



*Fig. 3.28 – Provino posizionato nel NAT*

Il NAT è dotato di un sistema di controllo e acquisizione dati e di un software per la gestione della prova. Inizialmente è necessario inserire i parametri relativi al provino (Fig. 3.29):

- Test temperature [°C]: temperatura di prova (20°C);
- Specimen diameter [mm]: diametro del provino (150 mm);
- Specimen thickness [mm]: altezza del provino (50 mm circa);
- Poisson's ratio: coefficiente di Poisson. Se non viene misurato è assunto pari a 0,35 per i conglomerati bituminosi;

- Target rise-time [ms]: tempo che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario per raggiungere la deformazione indicata. Nella sperimentazione il rise-time è pari a 124 ms;
- Target horizontal deformation [ $\mu\text{m}$ ]: deformazione orizzontale che la macchina deve far raggiungere al provino. Nella sperimentazione si è imposta una deformazione orizzontale di 5  $\mu\text{m}$ ;
- Number of conditioning pulses: numero di impulsi di precarico utili alla macchina per autocalibrarsi in modo da far raggiungere al provino la deformazione imposta. Nella sperimentazione le prove sono state eseguite con dieci colpi di condizionamento.

Test temperature (°C) =	20.0
Specimen diameter (mm) =	150.0
Specimen thickness (mm) =	61.2
Poisson's ratio =	0.35
Target rise-time (ms) =	124
Target horizontal deformation (microns) =	5
Number of conditioning pulses =	10

*Fig. 3.29 – Schermata di input del software ITSM*

Una volta inserito l’ID della prova che si sta eseguendo si porta a contatto il pistone che produce una sollecitazione di precarico di 30 N. Questa operazione si effettua cliccando sul pulsante “Make contact” (figura 3.30).

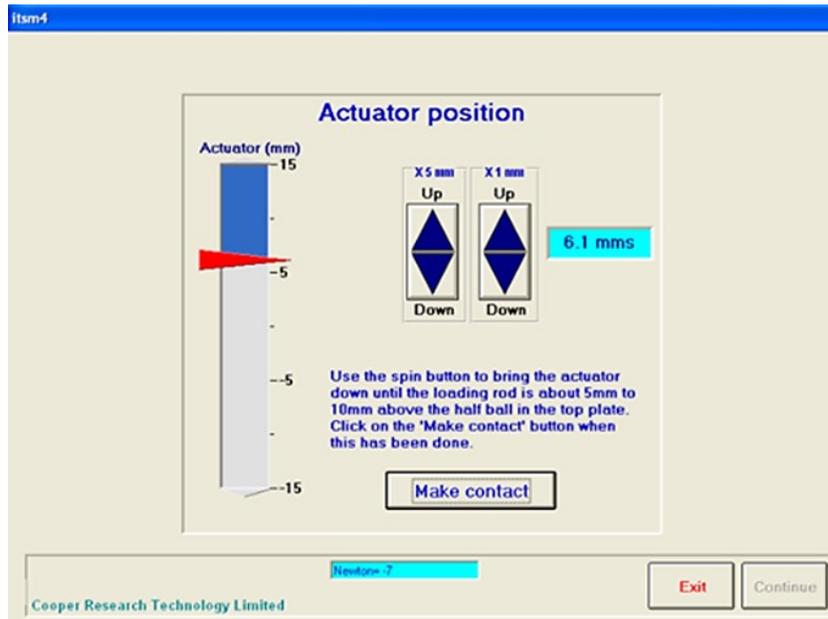


Fig. 3.30 – Schermata con il pulsante “Make contact”

Lo step successivo è quello di regolare i trasduttori in modo da ottenere una corretta misurazione della deformazione orizzontale. Il trasduttore è in posizione esatta quando si visualizzano sul display le frecce rosse (Fig. 3.31 e 3.32).

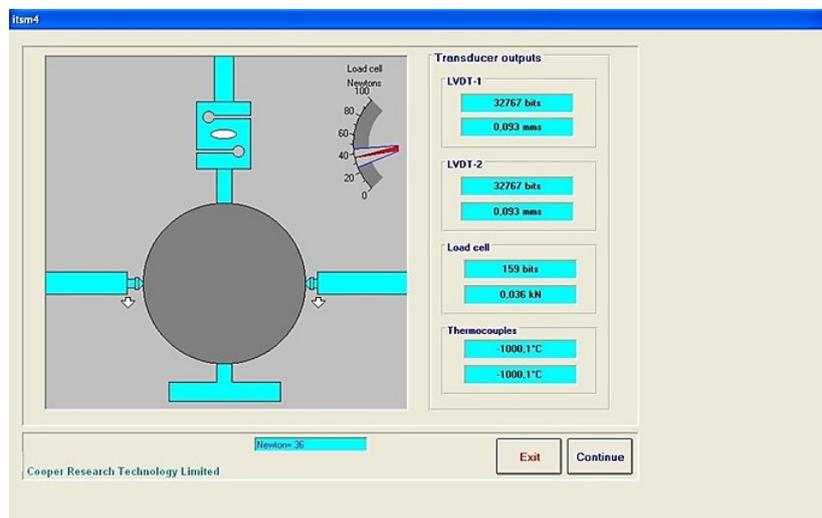


Fig. 3.31 – Trasduttori non regolati

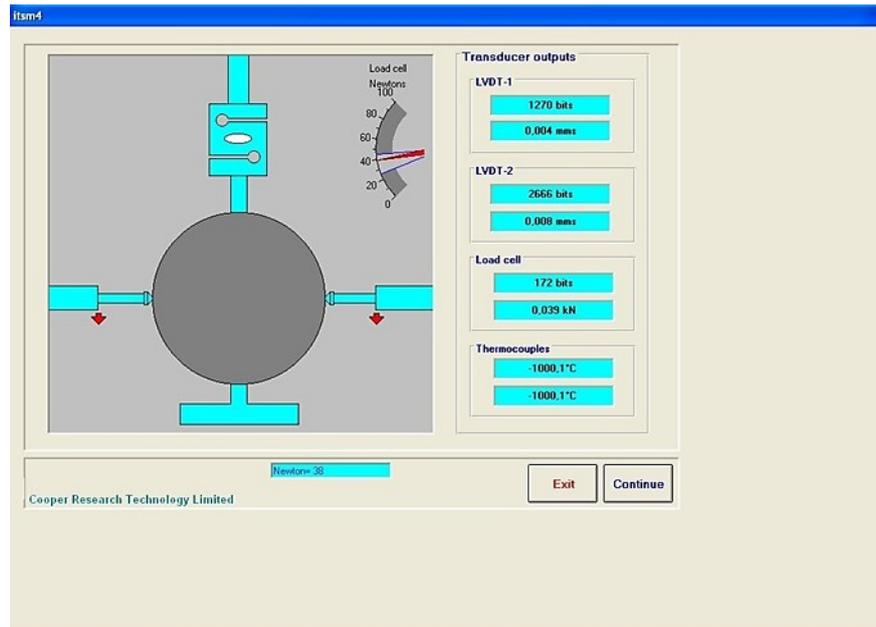


Fig. 3.32 – Trasduttori regolati

Una volta controllato che la temperatura della camera climatica sia di 20°C con un discostamento massimo di 0,5°C, si applicano i dieci impulsi di precarico. Nella schermata finale vengono indicati per i cinque impulsi di prova i parametri precedentemente descritti con i rispettivi valori medi.

Infine, si ruota il provino di un angolo pari a  $90^\circ \pm 10^\circ$  e si ripete la procedura descritta. Gli ITSM calcolati sui due diametri non devono differire più del 20%. Dalla loro media si ottiene il modulo di rigidezza a trazione indiretta definitivo.

### 3.3.8 Prova di resistenza a fatica a trazione indiretta

La resistenza a fatica di un materiale è quella resistenza che esso sviluppa a carichi di minore intensità rispetto a quelli che lo porterebbero ad una rottura immediata ma che ripetuti ciclicamente portano al collasso del materiale. Anche questa prova è stata eseguita mediante l'apparecchiatura NAT presente all'interno del laboratorio e, analogamente alla configurazione ITSM, prevede l'applicazione di un carico lungo il diametro verticale del provino. Tuttavia, la differenza sta nel fatto che tale carico viene applicato per un tempo sufficientemente lungo tale da provocare la rottura del campione. La normativa di riferimento è la UNI EN 12697-24 [19]. Il test ITFT (Indirect Tensile Fatigue Test) è molto

importante per la caratterizzazione dei conglomerati bituminosi in quanto consente di simulare i carichi veicolari a cui sono sottoposte le pavimentazioni stradali in esercizio.

È una prova a controllo di deformazione ma il software con cui viene effettuata richiede di inserire il valore di tensione orizzontale ( $\sigma$ ) necessario per ottenere il livello deformativo voluto. In particolare, noto il livello deformativo, attraverso la formula del modulo, si ricava la forza P da applicare al provino:

$$E = \frac{P \cdot (0,27 + \nu)}{\Delta H \cdot H}$$

$$P = \frac{E \cdot \Delta H \cdot H}{0,27 + \nu}$$

Successivamente, attraverso l'equazione sottostante, si stima il valore della tensione da imporre per ottenere la deformazione voluta:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot H}$$

Dove:

- P: carico applicato sul provino [kN];
- $\Delta H$  : spanciamento del provino [ $\mu\text{m}$ ];
- H: altezza del provino [mm];
- E: modulo del provino determinato mediante la prova ITSM [MPa];
- $\sigma$ : tensione orizzontale da dare come input al software [kPa];
- D: diametro del provino [mm].

Generalmente ai provini con rigidità maggiore si impostano livelli deformativi più alti; viceversa, ai provini con modulo inferiore si applicano deformazioni più basse. Il risultato che si ottiene al termine della prova è il numero di cicli necessari a causare la rottura del provino, in relazione al valore della deformazione iniziale effettiva (misurata dal macchinario nei primi cicli di carico).

Per eseguire la prova, oltre all'ausilio del NAT è necessario avere a disposizione i seguenti elementi:

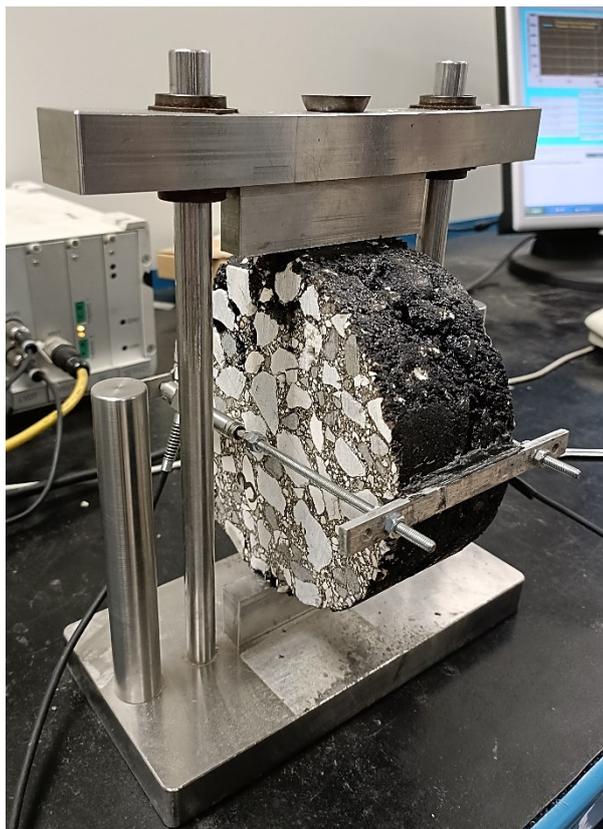
- 1) base di appoggio del provino;
- 2) 2 barrette (o placchette) metalliche (una con 4 fori e l'altra con 2 fori e 2 incavi nei quali vengono posizionati i trasduttori);
- 3) barra di carico superiore (con una sferetta in testa);
- 4) trasduttori;
- 5) 4 viti forate e 2 molle per sostenere le barrette all'incollaggio;
- 6) castelletto;
- 7) porta barrette;
- 8) colla ad acciaio liquido;
- 9) 2 viti + 4 bulloni per posizionare i trasduttori.

La prima fase di preparazione del provino prevede l'incollaggio delle barrette metalliche in punti opposti lungo uno dei due diametri rispetto ai quali, precedentemente, è stata determinata la rigidità, opportunamente segnati. Le barrette sono fondamentali per l'installazione dei trasduttori che consentono di misurare le deformazioni. Per effettuare questa operazione di incollaggio si utilizza una struttura composta da un castelletto ed un porta-barrette.

All'interno di quest'ultima componente si inserisce il provino. Si procede con l'inserimento di quattro viti nei fori più esterni delle barrette. All'interno di ulteriori forellini presenti nelle viti si inseriscono due molle che consentono la corretta adesione delle barrette al provino nel momento in cui verranno incollate.

Viene quindi miscelata la colla bicomponente e la si distribuisce nei punti precedentemente segnati (durante questa operazione il provino è fuori dal castelletto). Dopo aver applicato la colla si inserisce il provino dentro il castelletto, si stringono le due viti all'estremità e le

barrette aderiscono al provino. Infine si attende il tempo di asciugatura della colla e si condiziona il provino in camera climatica alla temperatura di prova di 20°C. Si posiziona poi il provino nella base di appoggio e si inserisce in testa la barra di carico superiore che consente di tenerlo fermo (Fig. 3.33). Si inseriscono quindi due viti fissate tramite due bulloni ciascuna e si aggiungono 2 bulloni all'estremità a contatto con il trasduttore come guida dello stesso.



*Fig. 3.33 – Provino nella base di prova e trasduttori posizionati*

Terminata la fase di preparazione del provino si introduce il tutto all'interno della camera climatica del NAT (Fig. 3.34) e si esegue la prova con l'ausilio del software 'ITFT-EN'.



Fig. 3.34 – Provino all'interno della camera climatica del NAT

All'apertura del software viene visualizzata la schermata riportata in figura 3.35.

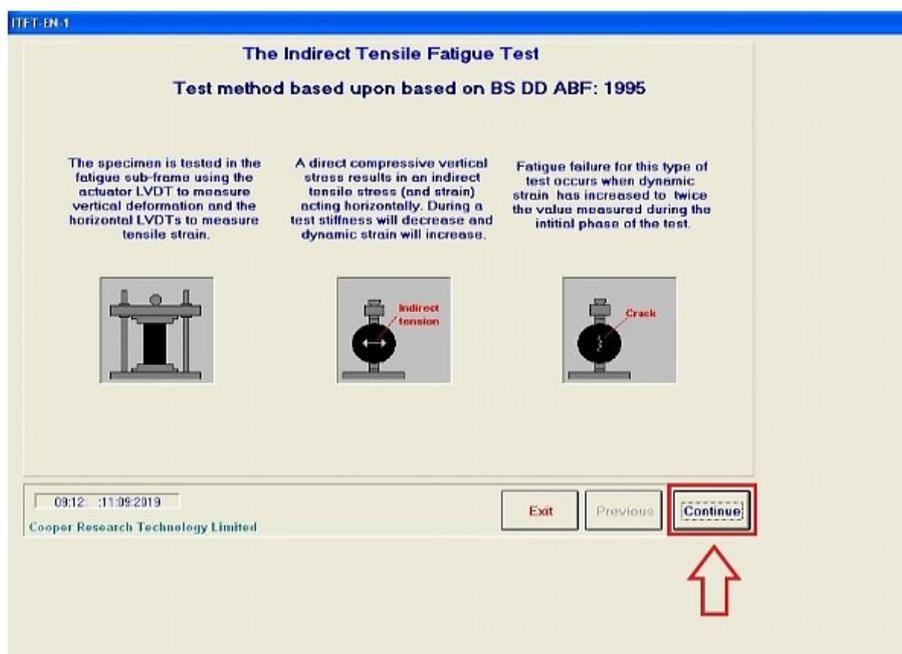


Fig. 3.35 – Schermata apertura software ITFT-EN

Cliccando Continua si apre una seconda schermata dove inserisco i parametri di input:

- Temperatura di prova (20°C);
- Diametro del provino (150 mm);
- Spessore del provino (50 mm circa);
- Horizontal stress (corrisponde al valore di tensione orizzontale da dare come input al programma, al fine di ottenere il livello deformativo voluto).

Dopo aver inserito i dati, si apre un'altra schermata, la quale richiede il corretto posizionamento dei trasduttori. Questo è garantito attraverso le due viti, inserite precedentemente nei fori delle barrette metalliche, che si stringono o allentano finché i trasduttori non risultano sufficientemente compressi. Quando le due lancette blu visibili sul monitor sono posizionate in prossimità del valore 1 (Fig. 3.36), il procedimento è corretto. Inoltre, per evitare la caduta dei trasduttori durante l'esecuzione della prova, è necessario stringere i bulloni posizionati sulle viti.

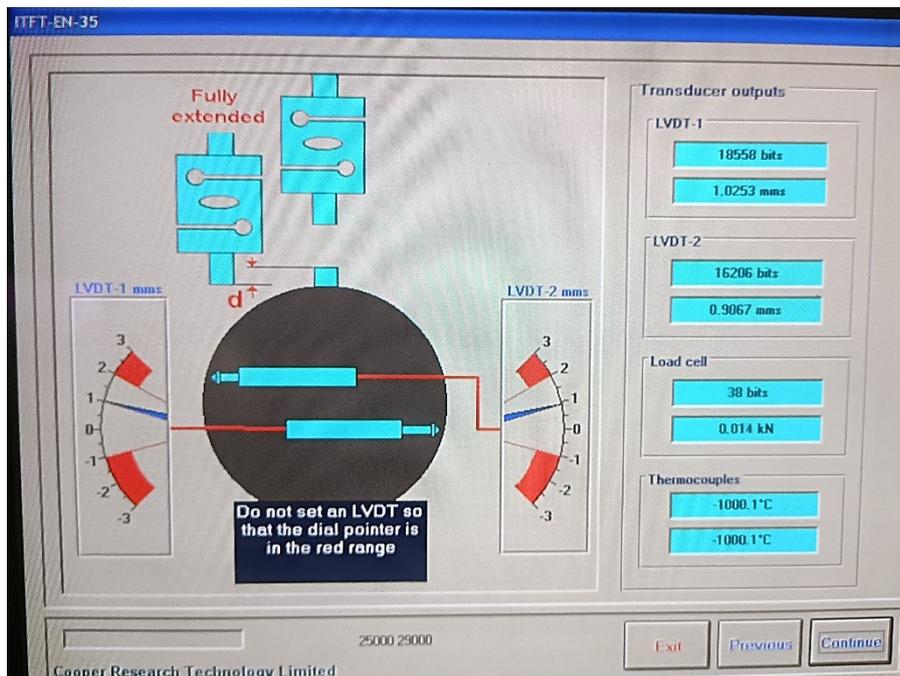


Fig. 3.36 – Posizionamento ottimale dei trasduttori

Terminata la fase di posizionamento dei trasduttori si preme nuovamente il tasto Continua e si entra in una finestra (Fig. 3.37) dove, attraverso il comando Start test, è possibile far scendere il pistone e mandarlo a contatto con la testa di carico posizionata sopra al provino.

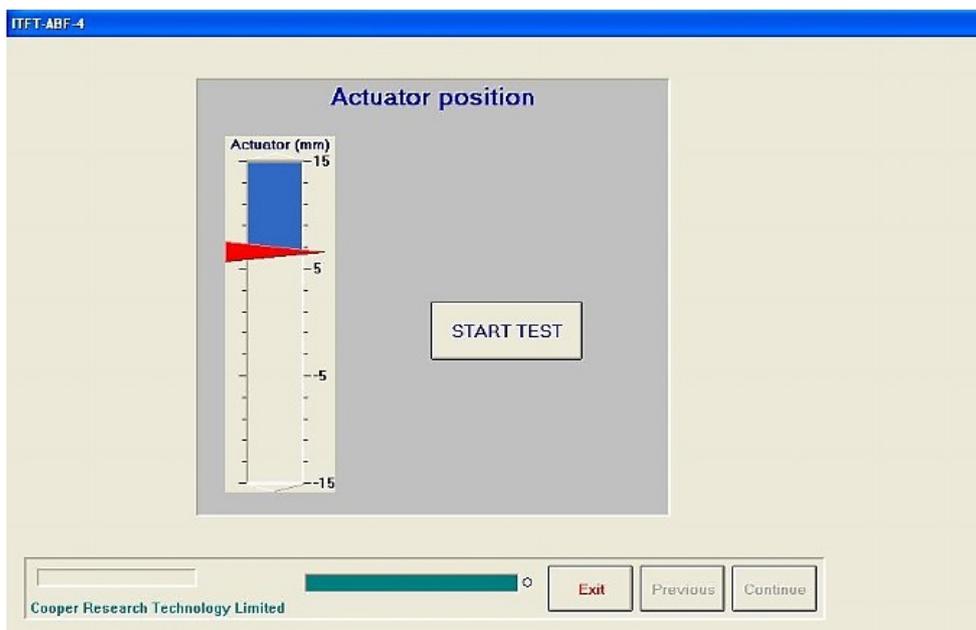


Fig. 3.37 – Schermata start test ITFT-EN

Una volta raggiunto il contatto, il NAT inizia ad applicare gli impulsi ed ha inizio la prova. Dopo 115 cicli di carico appare sul monitor il valore di initial total  $\mu$ strain (deformazione iniziale effettiva), se tale valore è simile a quello richiesto si procede, altrimenti si stoppa la prova e si cambia il valore della tensione orizzontale, si itera quindi il procedimento fino ad ottenimento della deformazione voluta.

Durante l'esecuzione del test viene mostrato un grafico in scala logaritmica, in cui in ascissa è riportato il numero di cicli di carico e in ordinata il valore della deformazione. Man mano che la prova avanza è possibile osservare l'andamento di due curve: una azzurra che rappresenta la deformazione verticale del provino (permanent vertical deformation) ed una rossa che indica quella orizzontale (permanent vertical deformation). La prova termina alla rottura fisica del provino oppure se la deformazione verticale supera quella massima di 15 mm (Fig. 3.38 e 3.39).

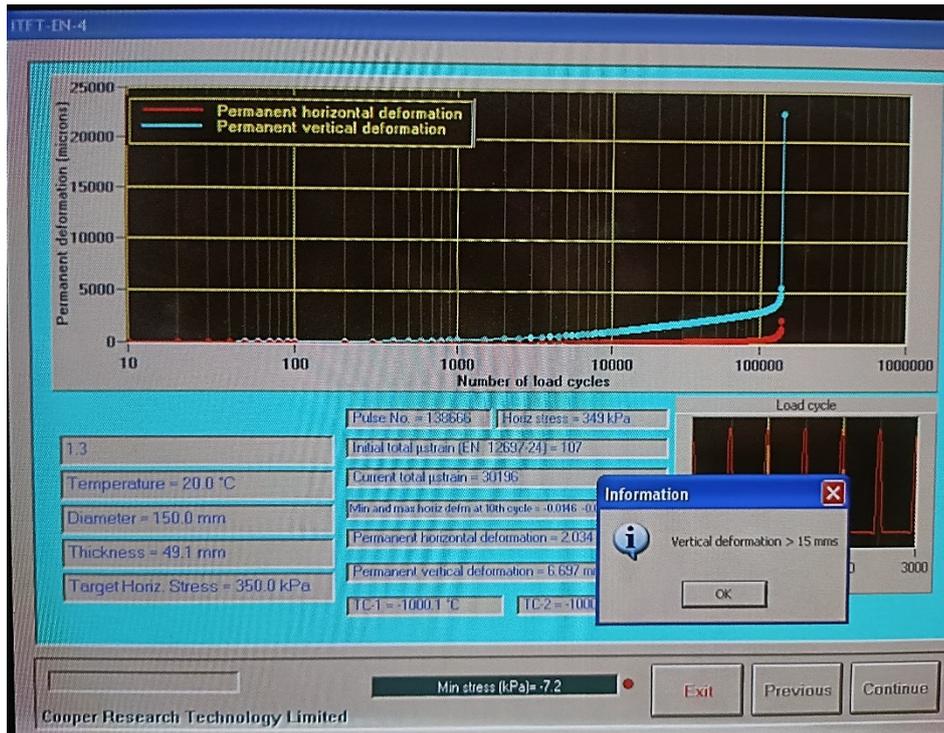


Fig. 3.38 – Schermata a rottura ITFT-EN

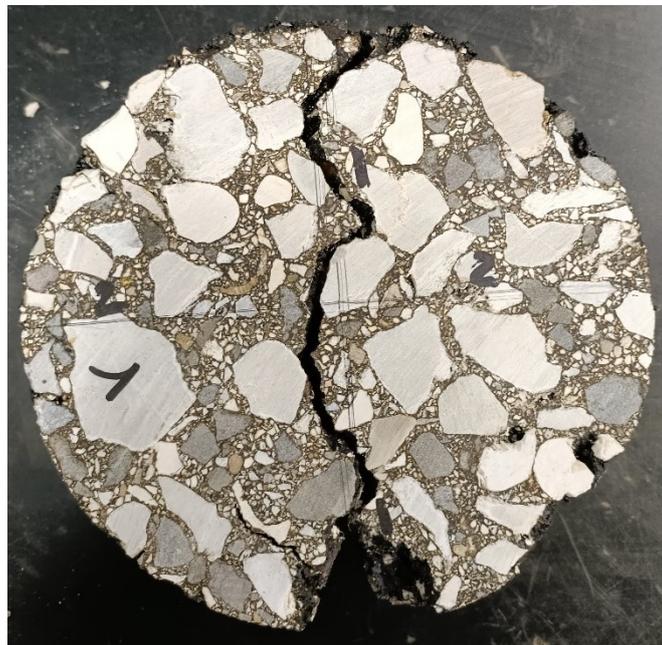


Fig. 3.39 – Provino rotto a fatica

## Capitolo 4 – Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono descritti ed illustrati i risultati ottenuti dall'attività sperimentale. Le prove eseguite sulle diverse miscele sono di seguito elencate:

- Valutazione della compattabilità (vuoti residui e CEI);
- prove di rottura a trazione indiretta (ITS);
- prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- prove di rottura a fatica (ITFT).

Per ciascun provino sottoposto alle prove meccaniche è inoltre riportata la relativa percentuale dei vuoti, determinata tramite la procedura SSD precedentemente descritta (Vedi paragrafo 3.3.4).

### 4.1 Valutazione della compattabilità

Viene illustrato (Fig. 4.1) il confronto tra le varie miscele in termini di vuoti dopo 10 giri e dopo 120 giri della pressa giratoria e in termini di CEI (Fig. 4.2).

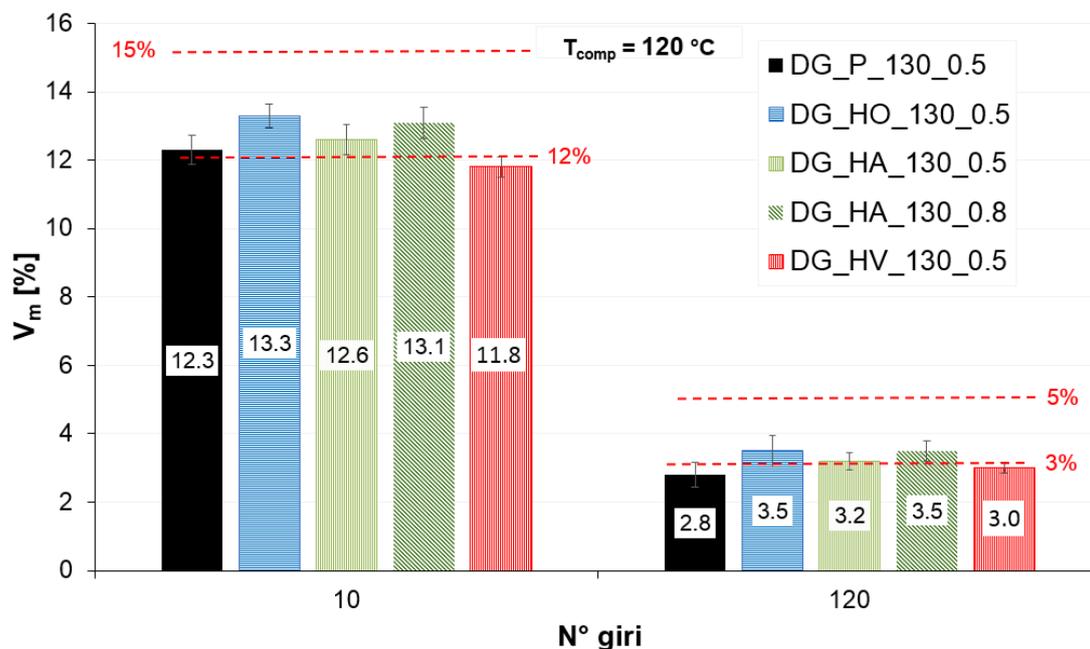


Fig. 4.1 – Confronto dei vuoti a 10 giri e a 120 giri

Le linee tratteggiate in rosso in figura 4.1 sono la rappresentazione grafica dei limiti da Capitolato ASPI Base Warm. Le percentuali di vuoti a 10 giri e a 120 giri di pressa giratoria tra le diverse miscele risultano del tutto confrontabili. La variabilità dei risultati è accettabile, in quanto le barre di errore (che rappresentano la deviazione standard) sono contenute. Si nota, inoltre, che non ci sono differenze significative tra le miscele DG\_HA\_130\_0.5 e DG\_HA\_130\_0.8 e quindi si può affermare che la percentuale di additivo non comporta differenze significative in termini di proprietà volumetriche.

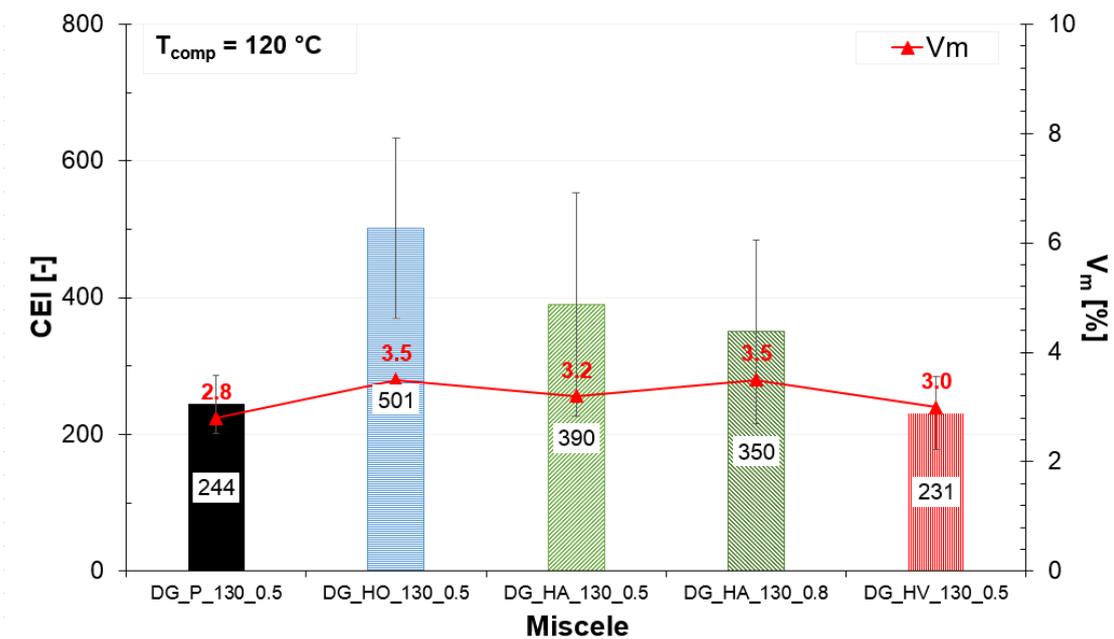


Fig. 4.2 – Confronto indice CEI

Osservando la figura 4.2 si vede che tendenzialmente le miscele contenenti HPMB esibiscono dei valori di CEI superiori rispetto alla miscela di riferimento, anche se la dispersione dei risultati non permette di giungere a conclusioni definitive. Questo si traduce in una peggiore compattabilità e quindi sarà necessaria una maggiore energia di compattazione per raggiungere lo stesso stato di addensamento. Tale risultato è correlabile alla percentuale di polimeri all'interno del bitume, infatti essi ostacolano lo scorrimento relativo degli aggregati all'interno della miscela durante la compattazione richiedendo così un maggiore sforzo da parte del compattatore (sia in laboratorio che in sito) per ottenere lo stesso risultato. Il valore CEI della miscela DG\_HV\_130\_0.5 sembra contraddire quest'ultima affermazione in quanto esso presenta la percentuale maggiore di polimeri (per

il legante HPMB HV la percentuale di polimeri attesa è intorno al 9%). Sarebbe interessante indagare, a tal proposito, se aumentare la percentuale di polimero anche all'interno degli altri HPMB (che si aggira intorno al 7.5%), possa portare ad una maggiore lavorabilità della miscela.

#### 4.2 Prove di rottura a trazione indiretta

Nelle seguenti sezioni si analizzano i risultati della prova di rottura a trazione indiretta.

##### 4.2.1 Miscela DG\_P\_130\_0.5

	DRY			WET		
<b>Camp.</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
<b>V<sub>m</sub> [%]</b>	1.8	2.3	3.6	2.6	2.5	2.3
<b>ITS [MPa]</b>	1.91	1.66	2.11	1.90	1.95	1.95

Tab. 4.1 – Risultati prova ITS miscela DG\_P\_130\_0.5

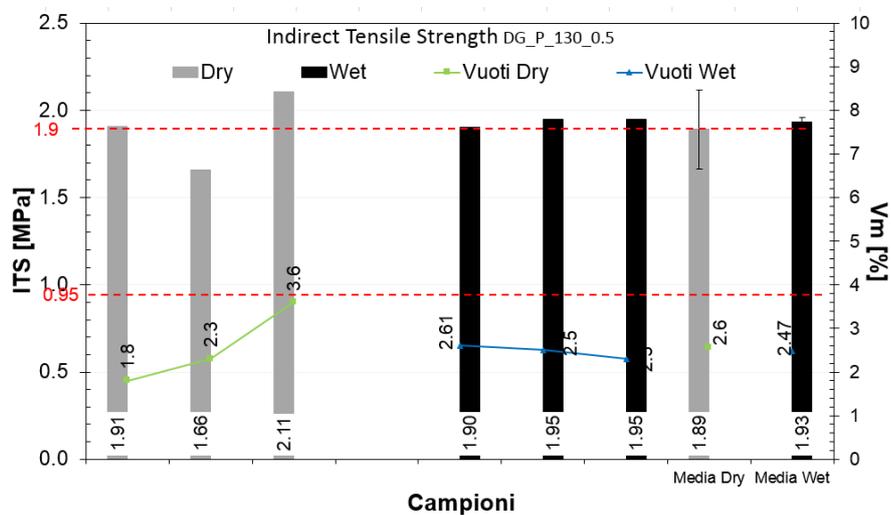


Fig. 4.3 – Risultati prova ITS miscela DG\_P\_130\_0.5

$$\text{ITSR} = 102.29 \%$$

#### 4.2.2 Miscela DG\_HO\_130\_0.5

	DRY			WET		
Camp.	1	2	5	3	4	6
V <sub>m</sub> [%]	2.8	3.0	3.8	3.5	3.3	3.7
ITS [MPa]	1.33	1.19	1.31	1.31	1.12	1.20

Tab. 4.2 – Risultati prova ITS miscela DG\_HO\_130\_0.5

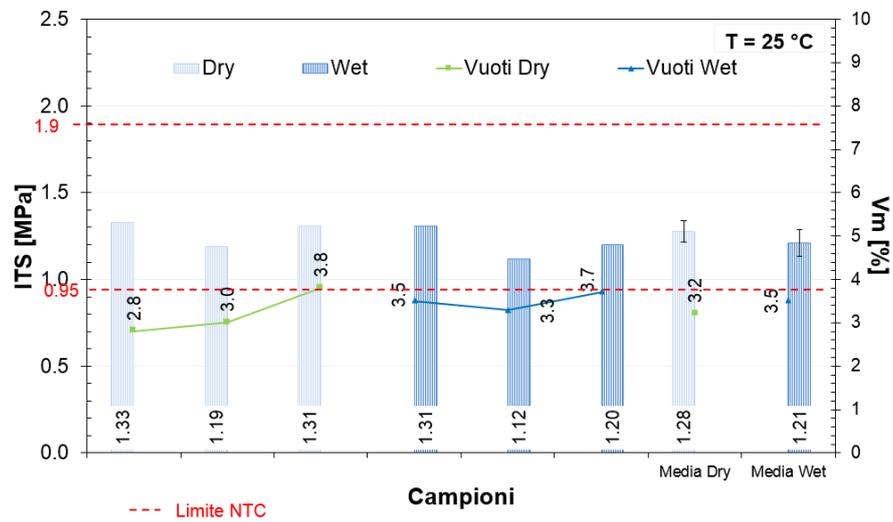


Fig. 4.4 – Risultati prova ITS miscela DG\_HO\_130\_0.5

ITSR = 94.65 %

### 4.2.3 Miscela DG\_HA\_130\_0.5

	DRY			WET		
Camp.	1	2	4	3	5	6
V <sub>m</sub> [%]	3.9	3.6	3.1	3.8	3.9	3.1
ITS [MPa]	1.54	1.20	1.34	0.88	1.71	1.91

Tab. 4.3 – Risultati prova ITS miscela DG\_HA\_130\_0.5

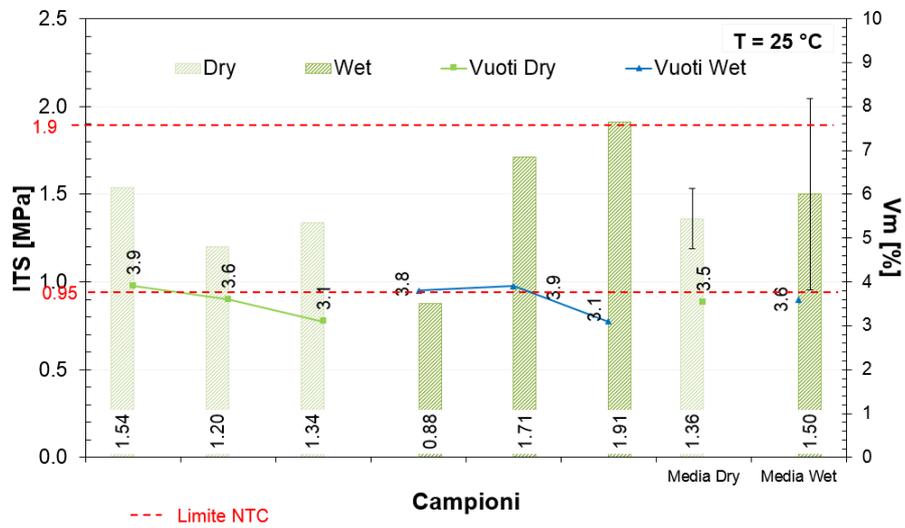


Fig. 4.5 – Risultati prova ITS miscela DG\_HA\_130\_0.5

ITSR = 110.45 %

#### 4.2.4 Miscela DG\_HA\_130\_0.8

	DRY			WET		
<b>Camp.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>
<b>V<sub>m</sub> [%]</b>	3.2	3.8	3.4	3.8	3.6	3.2
<b>ITS [MPa]</b>	1.20	1.31	1.66	1.37	1.29	1.83

Tab. 4.4 – Risultati prova ITS miscela DG\_HA\_130\_0.8

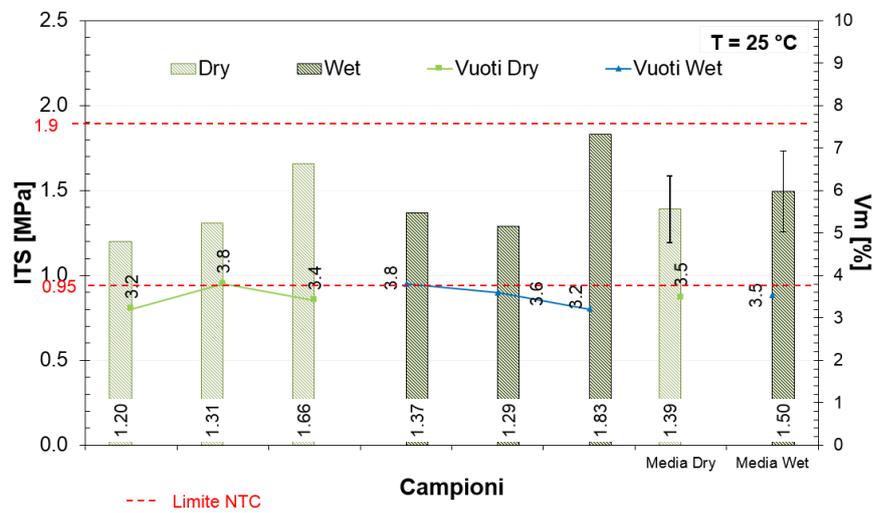


Fig. 4.6 – Risultati prova ITS miscela DG\_HA\_130\_0.8

$$\text{ITSR} = 107.45 \%$$

#### 4.2.5 Miscela DG\_HV\_130\_0.5

	DRY			WET		
Camp.	1	3	5	2	4	6
V <sub>m</sub> [%]	2.6	2.8	2.9	2.7	2.8	2.9
ITS [MPa]	1.21	1.29	1.24	1.28	1.19	1.16

Tab. 4.5 – Risultati prova ITS miscela DG\_HV\_130\_0.5

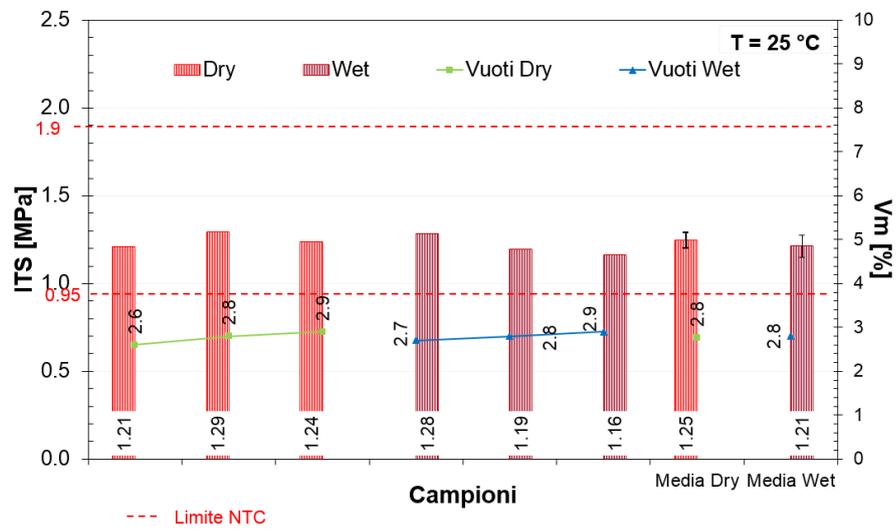


Fig. 4.7 – Risultati prova ITS miscela DG\_HV\_130\_0.5

ITSR = 97.27 %

#### 4.2.6 Confronto

Il seguente grafico (Fig. 4.8) mostra il confronto tra le miscele oggetto di studio in termini di resistenza a trazione indiretta (ITS).

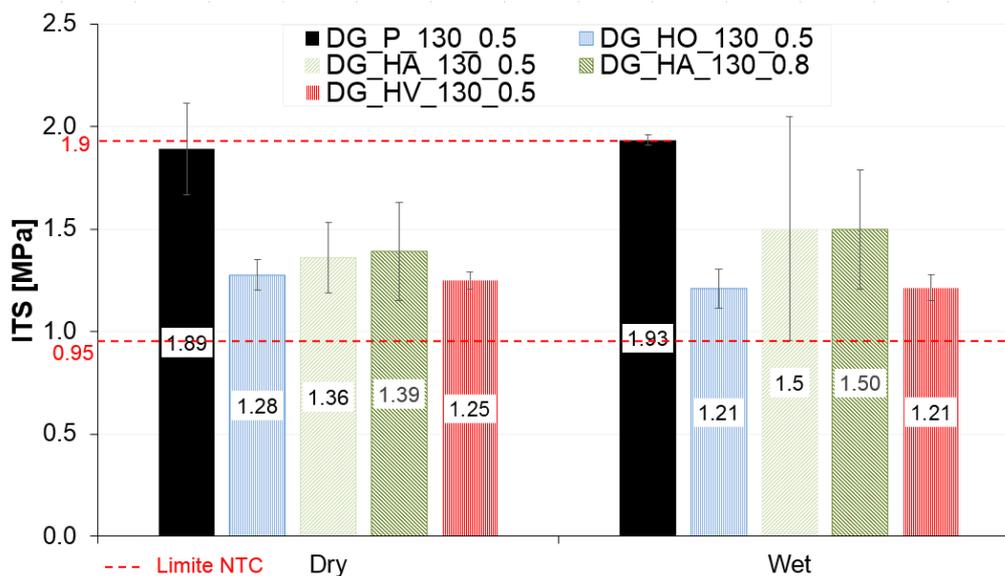


Fig. 4.8 – Confronto risultati prova ITS

Dai limiti NTC i valori di ITS devono essere compresi tra 0.95 e 1.90 MPa e tutte le miscele considerate rispettano tali limiti. Si osserva che, sia per la procedura di condizionamento dry che wet, i valori di ITS per le miscele contenenti bitumi super-modificati sono inferiori rispetto alla miscela di riferimento con bitume PMB (mediamente del 30%). Tale risultato può essere collegato al fatto che i bitumi HPMB sono più morbidi ed inoltre potrebbero essere caratterizzati da una peggiore adesione con gli aggregati.

Tuttavia, non si evidenziano differenze sostanziali tra i risultati dei dischi sottoposti a ITS dopo condizionamento dry e dopo condizionamento wet, il che significa che le miscele contenenti HPMB, come il riferimento, non sono caratterizzate da una significativa suscettività all'acqua se sottoposte al protocollo di condizionamento wet considerato (72 ore a 40°C).

### 4.3 Prove di modulo di rigidità a trazione indiretta

I risultati della prova di modulo a trazione indiretta vengono presentati ancora una volta distinguendo le diverse miscele. Va sottolineato che, per quanto riguarda le miscele con bitume super-modificato “HA”, è stata sottoposta a prove di modulo di rigidità a trazione indiretta solo la miscela con 0.5% di additivo sul bitume totale, poiché non ci sono differenze significative nella compattabilità rispetto a dosaggi di additivo superiori (Fig. 4.1) e tale dosaggio è lo stesso impiegato per tutte le altre miscele contenenti bitume super-modificato.

#### 4.3.1 Miscela DG\_P\_130\_0.5

Camp.	$h_{media}$ [mm]	$V_{SSD}$ [%]	Modulo 1 [MPa]	Modulo 2 [MPa]	Modulo M [MPa]
1	50.1	2.6	12875	13405	13140
2	50.0	2.7	15344	14665	15005
3	50.6	2.4	14250	14319	14285
4	49.9	3.1	12644	12909	12726
5	50.0	3.6	12046	12737	12392
6	49.8	3.9	13130	12860	12995

Tab. 4.6 – Risultati prova ITSM miscela DG\_P\_130\_0.5

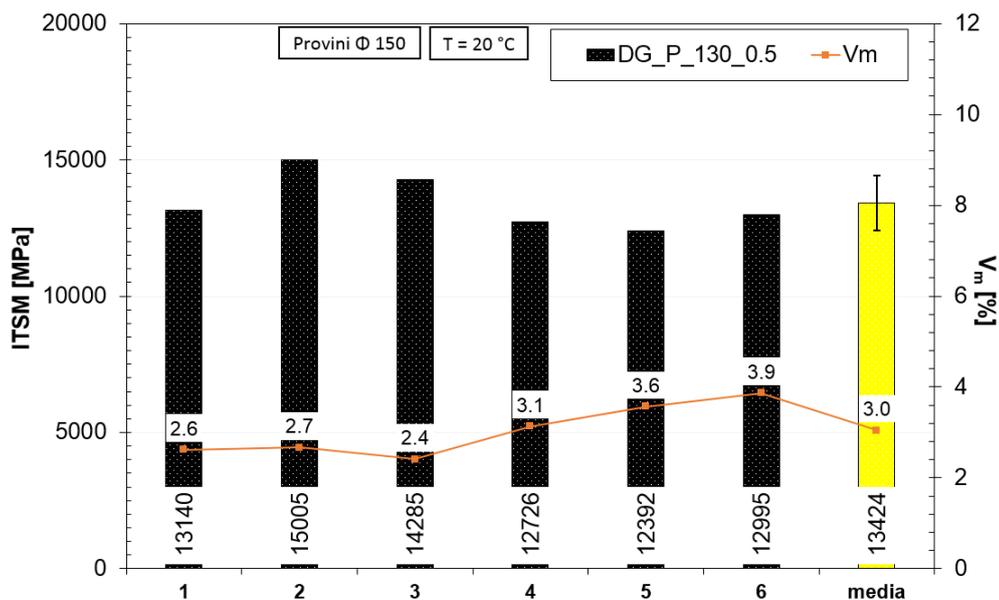


Fig. 4.9 – Risultati prova ITSM miscela DG\_P\_130\_0.5

#### 4.3.2 Miscela DG\_HO\_130\_0.5

Camp.	$h_{media}$ [mm]	$V_{SSD}$ [%]	Modulo 1 [MPa]	Modulo 2 [MPa]	Modulo M [MPa]
1	49.1	3.7	9587	8191	8889
2	51.4	3.5	9471	9141	9306
3	51.6	3.7	9762	9260	9511
4	50.8	3.9	7474	7785	7630
5	51.4	3.4	10678	10041	10360
6	51.1	4.1	7632	7122	7377
7	51.1	2.8	9161	9227	9194
8	52.0	4.1	7554	6657	7106
9	51.2	4.0	7357	5993	6675
10	51.5	3.0	8628	7996	8312
11	52.1	3.8	9726	8897	9312
12	51.4	3.9	7202	6960	7081

Tab. 4.7 – Risultati prova ITSM miscela DG\_HO\_130\_0.5

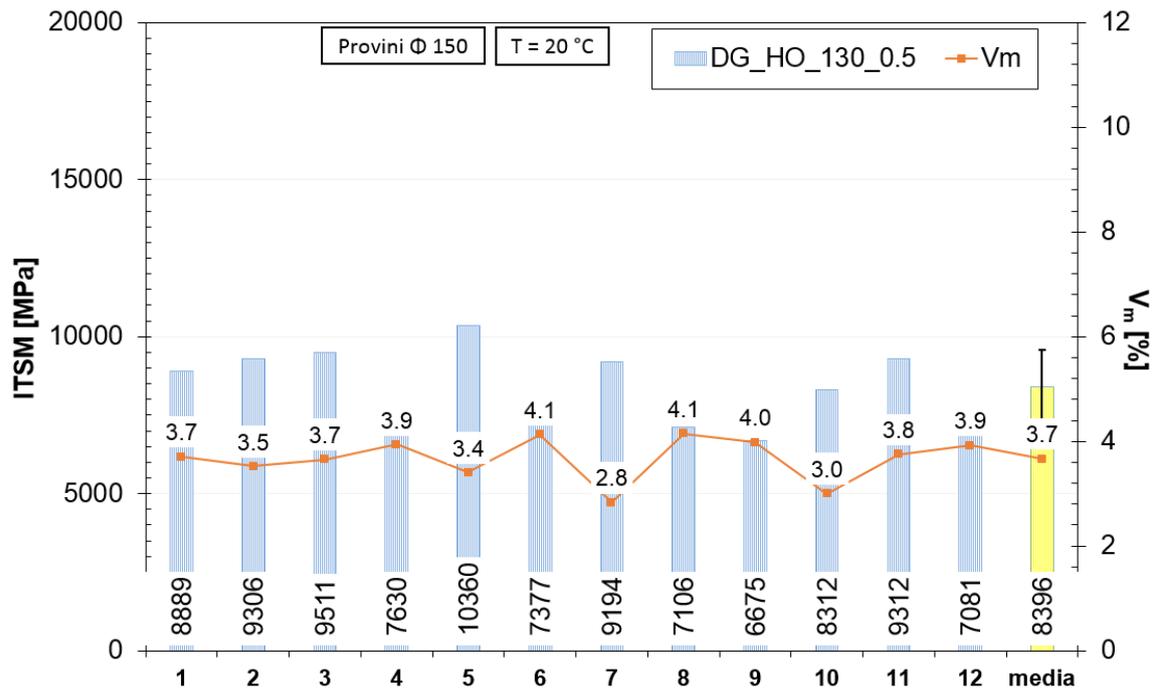


Fig. 4.10 – Risultati prova ITSM miscela DG\_HO\_130\_0.5

### 4.3.3 Miscela DG\_HA\_130\_0.5

Camp.	$h_{media}$ [mm]	$V_{SSD}$ [%]	Modulo 1 [MPa]	Modulo 2 [MPa]	Modulo M [MPa]
1	50.6	3.8	11377	10964	11171
2	51.1	3.7	13194	12282	12738
3	50.6	3.1	13895	14110	14003
4	50.8	3.3	12035	11821	11928
5	51.1	2.9	14497	13799	14148
6	50.9	3.5	12739	12683	12711
7	51.1	3.8	12384	12711	12548
8	50.7	2.2	16529	14387	15458
9	50.6	2.8	15929	15563	15746
10	50.8	3.9	12629	12150	12390
11	50.8	3.2	15812	15713	15763
12	51.1	3.3	15155	15066	15111

Tab. 4.8 – Risultati prova ITSM miscela DG\_HA\_130\_0.5

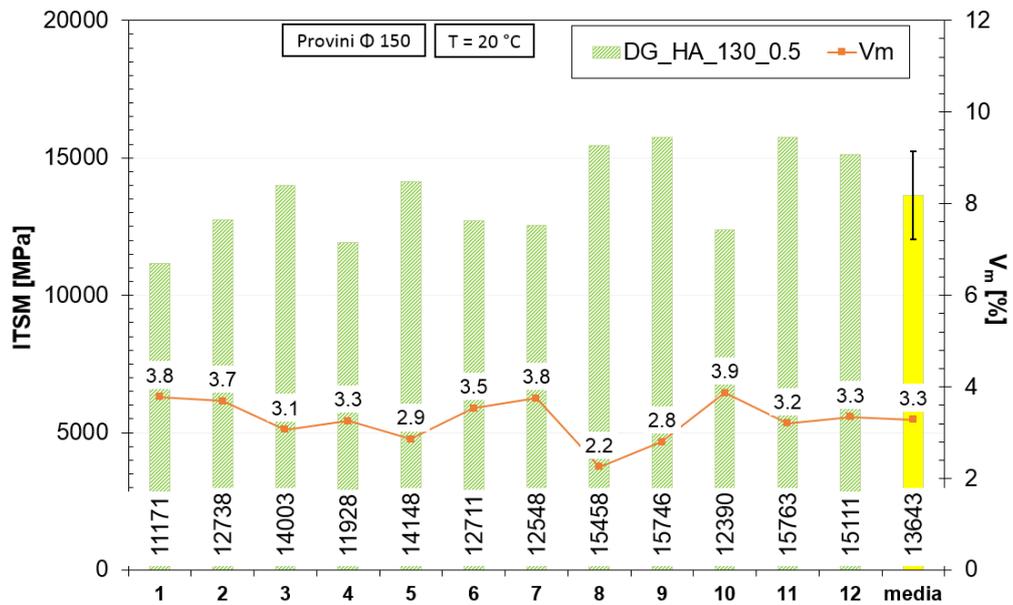


Fig. 4.11 – Risultati prova ITSM miscela DG\_HA\_130\_0.5

#### 4.3.4 Miscela DG\_HV\_130\_0.5

Camp.	$h_{media}$ [mm]	$V_{SSD}$ [%]	Modulo 1 [MPa]	Modulo 2 [MPa]	Modulo M [MPa]
1	50.2	3.6	10598	10018	10308
2	50.2	3.3	8788	8584	8686
3	50.1	3.6	7771	7299	7535
4	50.2	3.0	9754	9991	9873
5	49.8	3.7	9179	9901	9540
6	50.3	3.2	9169	9257	9213
7	49.5	4.3	9668	9048	9358
8	49.9	3.7	10267	10028	10148
9	50.1	3.9	9026	7927	8477
10	49.8	3.7	8575	9501	9038
11	50.3	4.1	9672	9703	9688
12	50.0	3.0	11271	10586	10929

Tab. 4.9 – Risultati prova ITSM miscela DG\_HV\_130\_0.5

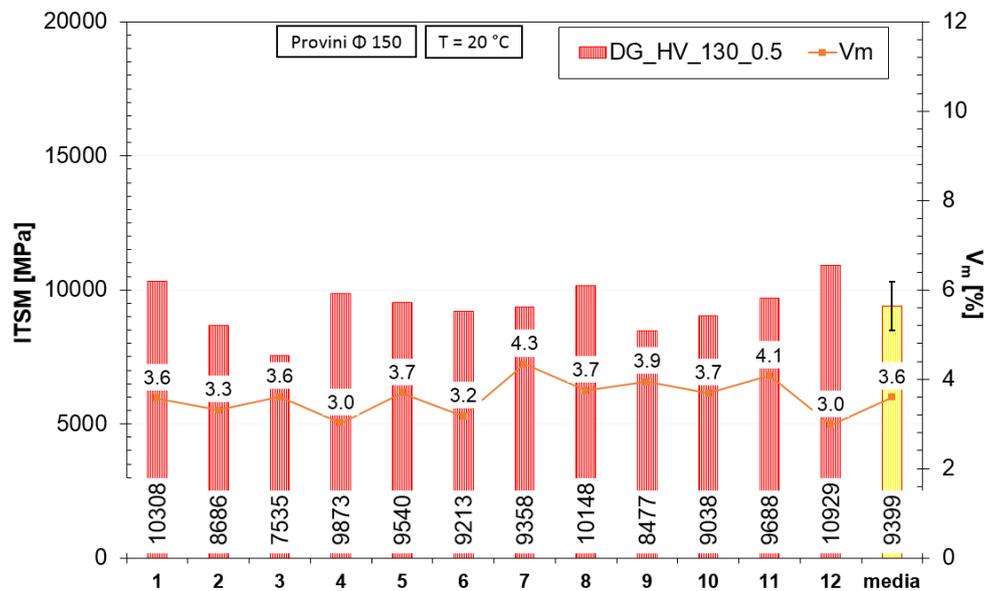


Fig. 4.12 – Risultati prova ITSM miscela DG\_HV\_130\_0.5

### 4.3.5 Confronto

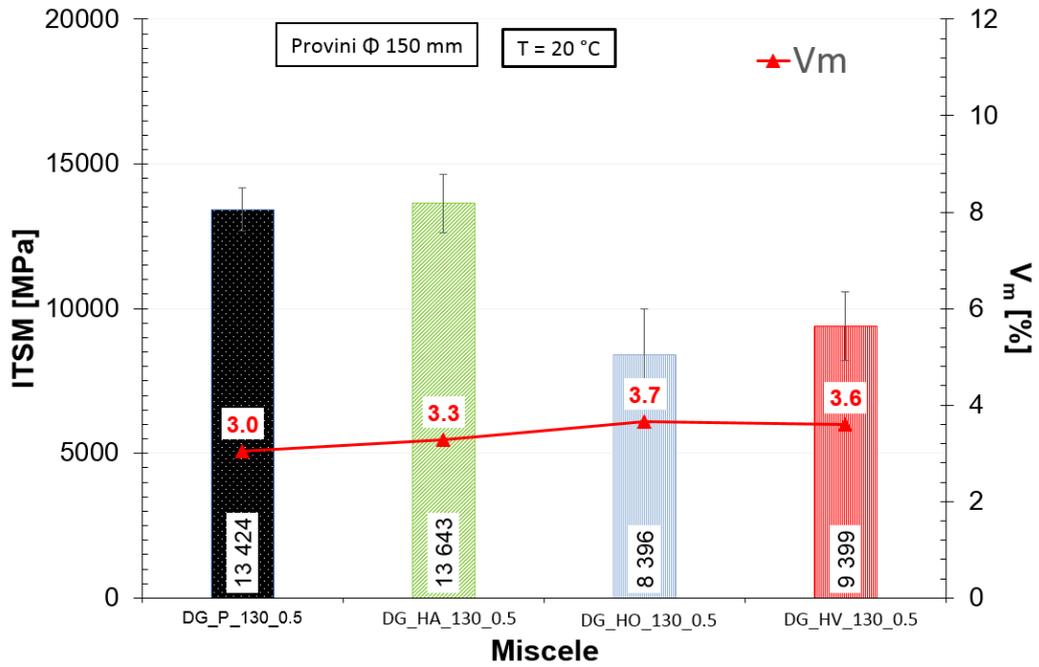


Fig. 4.13 – Confronto risultati prove ITSM

Dal grafico di confronto (Fig. 4.13) non si evidenziano differenze tra la miscela con bitume modificato convenzionale e quella contenente HPMB “HA”, mentre le altre due miscele risultano mediamente il 40% meno rigide. I bitumi HPMB “HO” e “HV” potrebbero essere più morbidi degli altri. Questo è coerente con i risultati di ITS (Fig. 4.8) dove si osserva come questi bitumi mostrano valori di ITS confrontabili tra loro ma più bassi tra le miscele testate.

#### 4.4 Prove di rottura a fatica

Anche in questa sezione, dedicata ai risultati della prova di rottura a fatica, si distinguono le diverse miscele. La miscela DG\_HA\_130\_0.8 non è stata sottoposta alle prove ITFT per le stesse motivazioni fornite nel paragrafo 4.3.

##### 4.4.1 Miscela DG\_P\_130\_0.5

V <sub>SSD</sub> [%]	Modulo M [MPa]	$\sigma_{v,max}$ [kPa]	P [kN]	$\epsilon_0, iniz$ [ $\mu strain$ ]	Nf [-]
2.6	13140	350	4.13	62	931376
2.7	15005	700	8.25	177	2000
2.4	14285	750	8.94	121	33536
3.1	12726	400	4.70	86	195256

Tab. 4.10 – Risultati prova ITFT miscela DG\_P\_130\_0.5

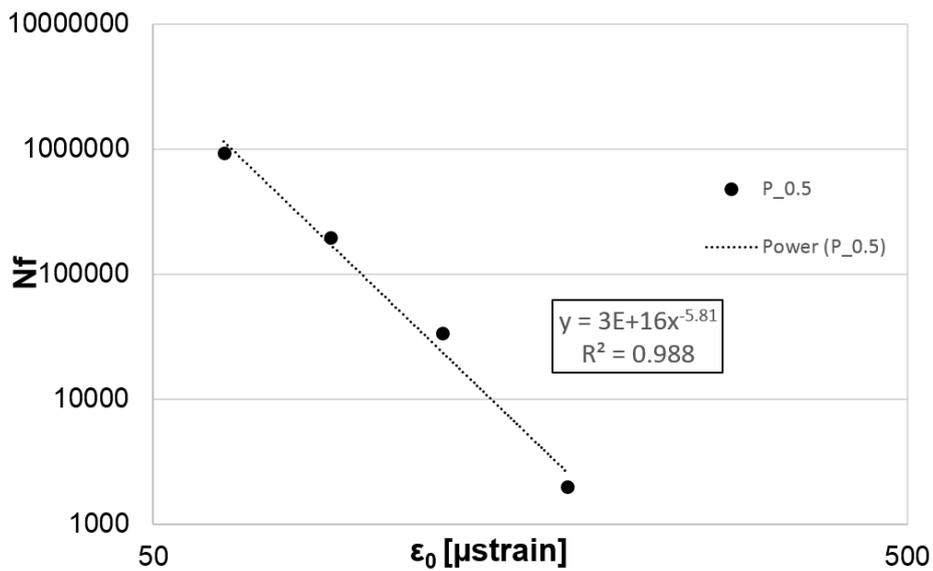


Fig. 4.14 – Risultati prova ITFT miscela DG\_P\_130\_0.5

#### 4.4.2 Miscela DG\_HO\_130\_0.5

V <sub>SSD</sub> [%]	Modulo M [MPa]	σ <sub>v,max</sub> [kPa]	P [kN]	ε <sub>0, iniz</sub> [μstrain]	Nf [-]
3.7	8889	350	4.05	107	138666
3.5	9306	500	6.06	198	8676
3.4	10360	550	6.66	151	23886
3.0	8319	400	4.85	137	56656
3.8	9312	550	6.75	174	12906
2.8	9194	350	4.21	97	236746

Tab. 4.11 – Risultati prova ITFT miscela DG\_HO\_130\_0.5

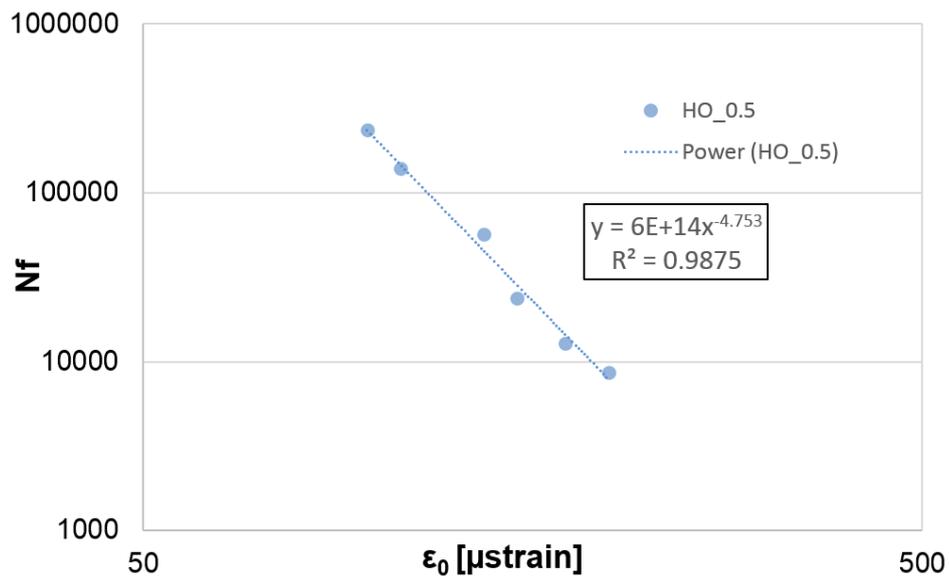


Fig. 4.15 – Risultati prova ITFT miscela DG\_HO\_130\_0.5

#### 4.4.3 Miscela DG\_HA\_130\_0.5

V <sub>SSD</sub> [%]	Modulo M [MPa]	$\sigma_{v,max}$ [kPa]	P [kN]	$\epsilon_0$ , iniz [ $\mu$ strain]	Nf [-]
3.8	11171	350	4.17	94	45916
3.1	14003	800	9.54	177	2086
2.9	14148	600	7.22	111	27106
3.8	12548	350	4.21	73	294356
2.2	15458	750	8.96	131	7026
3.9	12390	500	5.99	100	47336

Tab. 4.12 – Risultati prova ITFT miscela DG\_HA\_130\_0.5

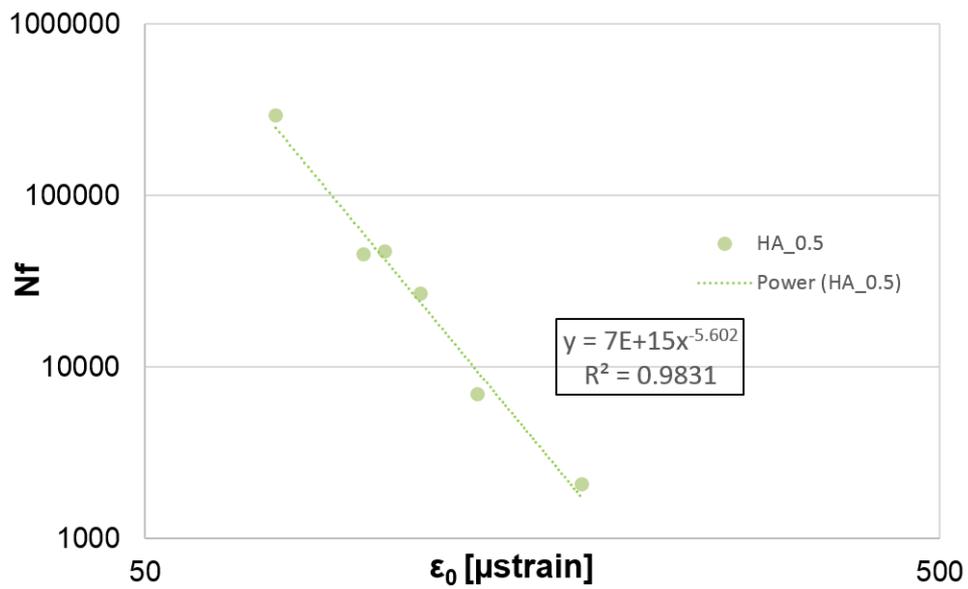


Fig. 4.16 – Risultati prova ITFT miscela DG\_HA\_130\_0.5

#### 4.4.4 Miscela DG\_HV\_130\_0.5

V <sub>SSD</sub> [%]	Modulo M [MPa]	$\sigma_{v,max}$ [kPa]	P [kN]	$\epsilon_0, iniz$ [ $\mu$ strain]	Nf [-]
3.3	8686	400	4.73	120	9526
3.2	9213	450	5.87	149	3676
3.7	9038	350	4.11	109	26456
4.1	9688	300	3.55	89	60306
3.7	10148	300	3.53	71	167786
3.7	9540	500	5.87	143	3976

Tab. 4.13 – Risultati prova ITFT miscela DG\_HV\_130\_0.5

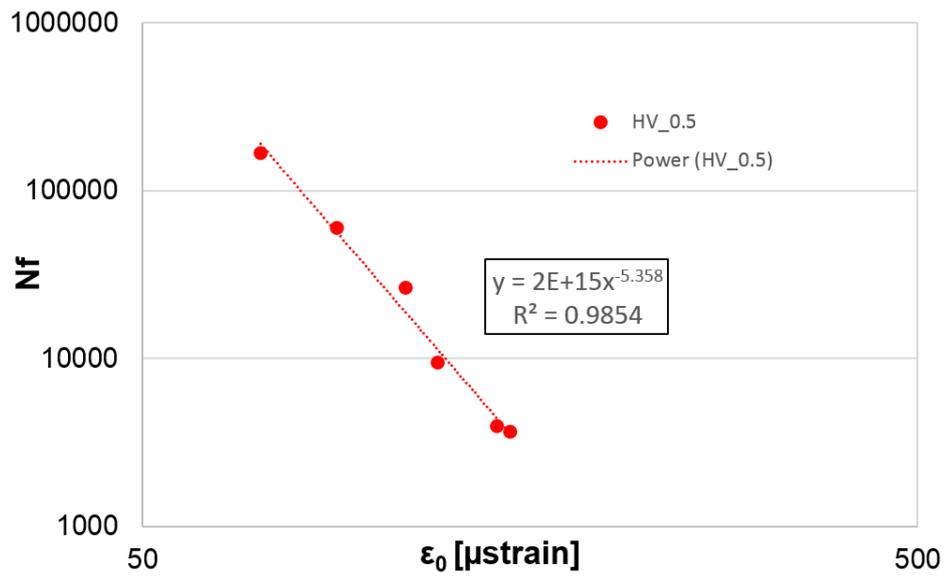


Fig. 4.17 – Risultati prova ITFT miscela DG\_HV\_130\_0.5

#### 4.4.5 Confronto

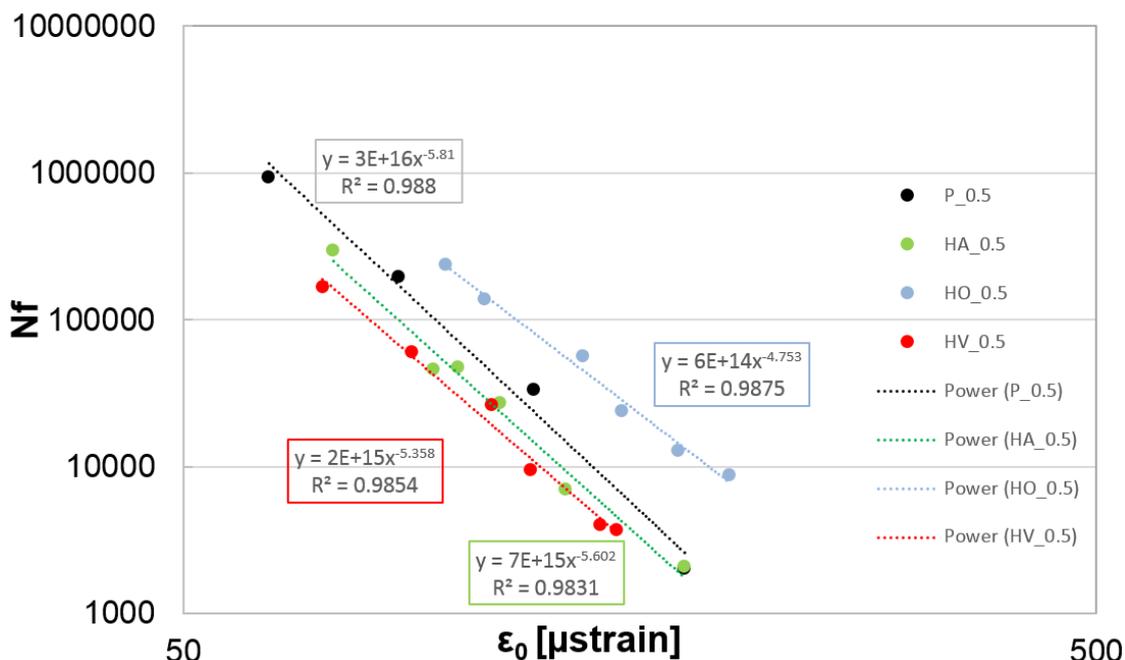


Fig. 4.18 – Confronto risultati prove ITFT

Per tutte le miscele i risultati sono attendibili, come confermato dal fatto che i valori del coefficiente di correlazione  $R^2$  sono prossimi a 1. Si osserva (Fig. 4.18) come la miscela con HPMB “HO” permette un incremento delle prestazioni aumentando significativamente il numero di cicli a rottura rispetto alla miscela di riferimento. A parità di livello deformativo l’impiego del bitume “HO” consente di raddoppiare ( $\epsilon_0 \approx 70 \mu\text{strain}$ ) o addirittura triplicare ( $\epsilon_0 \geq 120 \mu\text{strain}$ ) il valore di  $N_f$  rispetto al PMB di riferimento. Per le altre due miscele, invece, non si osserva un miglioramento del comportamento nei confronti dei carichi ciclici. Si è notato, in particolare per la miscela contenente HPMB “HV”, che, al momento della rottura fisica del provino, sulla superficie di rottura gli inerti calcarei risultavano quasi spogli (Fig. 4.19), indice del fatto che il bitume in oggetto potrebbe presentare delle problematiche in termini di adesione. Questa caratteristica negativa sembra emergere sia dai risultati delle altre prove meccaniche sulle miscele (prove ITS e ITSM, v. Fig. 4.8 e Fig. 4.13) sia da analisi preliminari sui bitumi.



Fig. 4.19 – Provino DG\_HV\_130\_0.5\_2 rotto a fatica (ITFT) – cerchiati in rosso gli aggregati carenti di bitume

Inoltre, il comportamento a fatica di una miscela si comprende meglio osservando il parametro  $\epsilon_6$ , ovvero il livello deformativo al quale corrisponde un numero di cicli a rottura pari a  $10^6$ . Vengono quindi riportati di seguito i valori ricavati dalle precedenti curve:

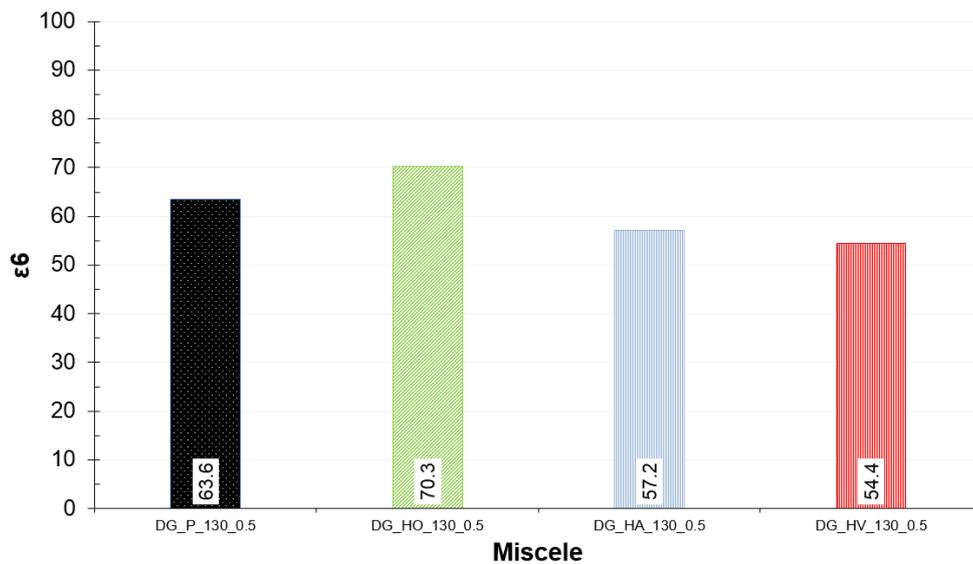


Fig. 4.20 – Valori di  $\epsilon_6$

Dai valori riportati in Fig. 4.20 si nota come il valore di  $\epsilon_6$  della miscela DG\_HO\_130\_0.5 è maggiore rispetto agli altri e dunque presenta una maggiore resistenza a fatica. Ancora una volta si mette in evidenza come le due miscele contenenti HPMB “HA” e “HV” sembrano essere, addirittura, meno prestanti della miscela di riferimento (risultato inatteso che necessita di ulteriori approfondimenti).

## ***Capitolo 5 – Conclusioni***

L'attività sperimentale, condotta presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura" dell'Università Politecnica delle Marche, è stata svolta al fine di studiare le prestazioni meccaniche di conglomerati bituminosi tiepidi al variare della tipologia di bitume impiegato. In particolare, sono stati testati un bitume modificato con polimeri di riferimento (PMB) e tre bitumi ad elevato tenore di modifica (HPMB HO, HPMB HA, HPMB HV).

Le miscele sono state prodotte e compattate in laboratorio, confezionando provini di diametro 150 mm. Sui provini sono state eseguite le seguenti prove:

- valutazione della compattabilità (vuoti residui e CEI);
- prove di rottura a trazione indiretta (ITS);
- prove di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- prove di rottura a fatica a trazione indiretta (ITFT)

Dall'analisi dei risultati è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- l'impiego di bitumi ad alto tenore di polimeri in conglomerati bituminosi tiepidi chiusi comporta valori di CEI tendenzialmente più elevati che denotano una compattabilità leggermente peggiore, è quindi necessaria una maggiore energia di compattazione per raggiungere lo stesso stato di addensamento di un conglomerato con bitume modificato convenzionale;
- nelle prove di rottura a trazione indiretta (ITS) si osserva che, sia per la procedura di condizionamento dry che wet, i valori di ITS per le miscele contenenti bitumi super-modificati sono inferiori rispetto alla miscela di riferimento con bitume PMB (mediamente del 30%);
- Dalle prove di modulo a trazione indiretta (ITSM) non si evidenziano differenze confrontando la miscela con PMB e quella contenente HPMB "HA", mentre le

miscele contenenti HPMB “HO” e “HV” risultano meno rigide delle altre (circa del 40%);

- dalle prove di rottura a fatica a trazione indiretta (ITFT) si evince che la miscela con bitume HPMB “HO” permette un incremento significativo delle prestazioni (il numero di cicli a rottura aumenta di 2÷3 volte rispetto alla miscela con bitume PMB). Al contrario, per le miscele con bitume HPMB HA e HPMB HV si osserva un leggero peggioramento della resistenza ai carichi ciclici;
- Il comportamento osservato per le miscele con bitume HPMB HA e HPMB HV potrebbe dipendere principalmente da un peggioramento dell’adesione tra bitume e aggregati. Tale aspetto necessita di ulteriori approfondimenti in futuro.

I risultati della presente sperimentazione mettono in evidenza il fatto che, se opportunamente ingegnerizzati, i bitumi ad alto tenore di polimeri possono incrementare significativamente la durata delle pavimentazioni, permettendo così di abbattere i costi di manutenzione a lungo termine. Inoltre, è possibile affermare che l’applicazione di questi bitumi innovativi porta a buoni risultati anche introducendo nel mix design una percentuale di fresato del 30% e utilizzando la tecnologia WMA, permettendo così di produrre miscele sostenibili ad elevata durabilità.

Tuttavia, la sperimentazione condotta non può essere considerata esaustiva, tali esiti necessitano di ulteriori studi al fine di avere una prospettiva più ampia sul comportamento meccanico di questi materiali relativamente “nuovi” sul mercato.

## *Riferimenti*

- [1] A. Rosinger. Beitrage zur kolloidchemie des asphalt. Kolloid-Zeitschrift, 15: 177–179, 1914
- [2] J. Ph. Pfeiffer and R. N. J. Saal. Asphaltic Bitumen as Colloid System. The Journal of Physical Chemistry, February 1940
- [3] Jiqing Zhu , Björn Birgisson, Niki Kringos (2014), “Polymer modification of bitumen: Advances and challenges”, European Polymer Journal
- [4] Michele Porto, Paolino Caputo, Valeria Loise, Shahin Eskandarsefat, Bagdat Teltayev and Cesare Oliviero Rossi (2019), “Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances”, Applied Sciences
- [5] Carlos Rivera, Silvia Caro, Edith Arambula-Mercado, Diana B. Sanchez, Pravat Karki (2021), “Comparative evaluation of ageing effects on the properties of regular and highly polymer modified asphalt binders”, Elsevier, Construction and Building Materials
- [6] Jhony Habbouche, Elie Y. Hajj, Peter E. Sebaaly & Murugaiyah Piratheepan (2018), “A critical review of high polymer-modified asphalt binders and mixtures”, International Journal of Pavement Engineering
- [7] Wangjie Wu, Maria Chiara Cavalli, Wei Jiang, Nicole Kringos (2024), “Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen”, Elsevier, Construction and Building Materials
- [8] Chuanqi Yan, Weidong Huang, Peng Lin, Yuan Zhang, Quan Lv (2019), “Chemical and rheological evaluation of aging properties of high content SBS polymer modified asphalt”, Elsevier, Fuel
- [9] Peng Lin, Chuanqi Yan, Weidong Huang, YiLi, Lu Zhou, Naipeng Tang, Feipeng Xiao, Yi Zhang, Quan Lv (2019), “Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt”, Elsevier, Construction and Building Materials
- [10] Jhony Habbouche, Ilker Boz, Elie Y. Hajj & Nathan E. Morian (2022), “Influence of aging on rheology-and chemistry-based properties of high polymer-modified asphalt binders”, International Journal of Pavement Engineering
- [11] Naipeng Tang, Weidong Huang, Gengren Hao (2021), “Effect of aging on morphology, rheology, and chemical properties of highly polymer modified asphalt binders”, Elsevier, Construction and Building Materials

- [12] UNI EN 933-1, 2012, “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura”
- [13] UNI EN 12697-5, 2019, “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 5: Determinazione della massa volumica massima”
- [14] UNI EN 12697-6, 2020, “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi”
- [15] UNI EN 12697-8, 2019, “Miscele bituminose – Metodi di prova - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”
- [16] UNI EN 12697-23, 2018, “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi”
- [17] UNI EN 12697-26, 2018, “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 26: Rigidezza”
- [18] UNI EN 12697-12-2018, Determinazione della sensibilità all’acqua dei provini bituminosi
- [19] UNI-EN 12697-24: 2018. “Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 24: Resistenza alla fatica”