



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE
IN
INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

**CONFRONTO DELL'OMOGENEITÀ DELLE PRESTAZIONI
MECCANICHE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI CONFEZIONATI
CON BITUMI MODIFICATI E COMPOUND POLIMERICI**

*Comparison of mechanical performance homogeneity of asphalt mixtures
produced with modified bitumen or polymeric compounds*

Relatore: Chiar.mo/a
Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di Laurea di:
Luca Luciani

Correlatore:
Ing. Lorenzo Paolo Ingrassia

Anno accademico 2019/2020

Indice

1. Introduzione.....	1
2. Modifica del bitume e del conglomerato bituminoso.....	5
2.1 Bitumi modificati con polimeri SBS	5
2.2 Miscele bituminose modificate con compound polimerici.....	7
3. Indagine sperimentale.....	11
3.1 Programma sperimentale.....	11
3.2 Materiali.....	13
3.3 Proprietà volumetriche e resistenza a trazione indiretta.....	15
3.4 Prove di modulo a trazione indiretta (ITSM).....	19
3.5 Prove cicliche a fatica (ITFT).....	29
4. Analisi dei risultati.....	34
4.1 ITSM.....	34
4.2 ITFT.....	40
5. Conclusioni.....	46
6. Bibliografia e sitografia.....	48

1 Introduzione

La pavimentazione è una parte del corpo stradale costituita da un insieme di strati sovrapposti, di materiali e spessori diversi aventi funzione di sopportare le azioni indotte dal traffico e di trasmetterle e distribuirle al terreno di appoggio (sottofondo), nonché di garantire agli utenti condizioni di sicurezza e comfort di marcia (superficie regolare e poco deformabile). Le prestazioni delle pavimentazioni sono strettamente legate al comportamento in opera dei conglomerati bituminosi.

Il conglomerato bituminoso è un materiale costituito da una miscela eterogenea di aggregati lapidei e dal bitume (legante). Il bitume è un composto organico eterogeneo derivato dal processo di distillazione del greggio del petrolio. È un materiale termoplastico con potere legante e impermeabilizzante. In un conglomerato bituminoso il bitume ha la funzione di conferire alla miscela la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute ai carichi superficiali indotti dal passaggio degli pneumatici dei veicoli (carichi di traffico).

Le proprietà meccaniche, fisiche e chimiche del bitume influenzano le prestazioni in opera. Per migliorare le caratteristiche reologiche del bitume si è iniziato a modificarlo con l'aggiunta di sostanze di diversa natura quali agenti chimici o polimeri. La sostanza che viene usata maggiormente attualmente per la modifica del bitume è il polimero SBS (stirene-butadiene-stirene). Esso è un polimero termoplastico elastomerico, che modifica e migliora il comportamento elastico e duttile della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura, del carico a rottura e della resistenza a carichi ciclici.

Negli ultimi tempi si stanno sperimentando materiali di nuova generazione e all'avanguardia per la modifica e il miglioramento del conglomerato bituminoso: tra questi spiccano i compound polimerici. Un prodotto di questa tipologia disponibile sul mercato è oggetto del presente studio. In particolare, si tratta di granuli di lunghezza di circa 3 mm formati da miscele di polimeri plastomerici (Figura 1.1) che si aggiungono direttamente nel mescolatore durante la produzione (tecnologia PMA – Polymer Modified Asphalt) e migliorano le prestazioni fisico-meccaniche dei conglomerati bituminosi.



Figura 1.1 – Compound polimerico oggetto di studio

L'obiettivo del lavoro descritto in questa tesi è quello di determinare, attraverso prove di laboratorio, le caratteristiche meccaniche di provini di conglomerato bituminoso modificato con SBS e con compound polimerici plastomerici provenienti dallo strato di base di un tronco sperimentale in vera grandezza e valutare l'omogeneità delle prestazioni di tali materiali.

Il tronco sperimentale è stato realizzato sulla complanare di accesso all'Area di servizio Prenestina Est (Figura 1.2). Le aree di intervento sono $100 \times 5 \text{ m}^2$ per le miscele con il compound polimerico (provini serie A) e $100 \times 5 \text{ m}^2$ per le miscele con bitume SBS HARD (provini serie B).



Figura 1.2 – Ubicazione del tronco sperimentale

Al fine di studiare le caratteristiche dei due diversi tipi di conglomerato bituminoso, nella sperimentazione sono state considerate due diverse prove di laboratorio, Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) e Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT), effettuate entrambe mediante l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester) e descritte e documentate nei capitoli seguenti. Tali prove hanno permesso di valutare il modulo di rigidezza e la resistenza a fatica dei provini provenienti dal tronco sperimentale.

La tesi è strutturata nel modo seguente:

- Capitolo 1: introduzione dell'obiettivo dello studio e del programma di lavoro;
- Capitolo 2: panoramica generale sulla modifica dei bitumi e dei conglomerati bituminosi;

- Capitolo 3: descrizione dettagliata del programma sperimentale (caratteristiche dei materiali, proprietà volumetriche e resistenza a trazione indiretta, prove ITSM e prove ITFT);
- Capitolo 4: analisi dei risultati ottenuti dalle prove di laboratorio;
- Capitolo 5: conclusioni sul lavoro svolto.

2 Modifica del bitume e del conglomerato bituminoso

2.1 Bitumi modificati con polimeri SBS

I bitumi tradizionali hanno dei limiti prestazionali riguardanti (tra gli altri aspetti) la resistenza alle deformazioni permanenti, la fessurazione termica, il comportamento a fatica, l'adesione. Per ovviare a queste problematiche si sono introdotti additivi o agenti di modifica di natura diversa (naturali e chimici) per migliorare le caratteristiche reologiche del bitume. L'aggiunta di questi agenti modifica le proprietà fisiche e chimiche del bitume ed i più comuni sono principalmente gomme provenienti dal riciclo degli pneumatici, filler, cere paraffiniche, fibre, catalizzatori e soprattutto polimeri.

Il polimero è una sostanza formata da macromolecole la cui struttura è composta da piccole unità monomeriche di una (omopolimero) o più specie (copolimero). La grande varietà di polimeri permette il miglioramento mirato di determinate caratteristiche del bitume.

Tra i polimeri, i più impiegati per la modifica del bitume sono i termoplastici. Se riscaldati, tali polimeri diventano fluidi e lavorabili e tale processo è reversibile. A loro volta, i polimeri termoplastici si suddividono in:

- elastomerici
- plastomerici.

I polimeri elastomerici, in particolare, sono maggiormente usati, in quanto permettono di migliorare il comportamento elastico e duttile del bitume con conseguente incremento della deformazione a rottura, del carico a rottura e della resistenza a carichi ciclici. Uno dei principali elastomeri è il polimero SBS (stirene-butadiene-stirene). L'elastomero SBS è un copolimero a blocchi in cui sono incorporate sezioni di polistirene ed una sezione centrale di polibutadiene (Figura 2.1).

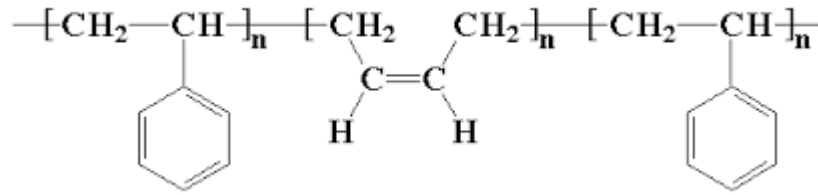


Figura 2.1 – Struttura del copolimero a blocchi SBS

Il poli-(stirene-butadiene-stirene) è una gomma termoplastica resistente e comunemente utilizzata nel settore infrastrutturale. Una caratteristica fondamentale che lo rende particolarmente indicato per l'utilizzo in questo settore è la sua durabilità.

Il polistirene è una plastica tenace e resistente e conferisce all'elastomero SBS la durabilità. La presenza dell'anello benzenico, ad elevato ingombro sterico, determina un irrigidimento della catena stirenica, un impedimento allo scorrimento delle catene stesse ed una totale mancanza di cristallinità se atattico. Il polibutadiene è una gomma sintetica che possiede un'elevata resistenza all'uso tanto da essere impiegata nella fabbricazione di pneumatici per automobili; la sua elasticità conferisce all'SBS le proprietà gommosi.

Le catene stireniche tendono a formare domini rigidi ed i differenti domini risultano legati tra loro dalle catene gommosi del polibutadiene. Questo dona al materiale la capacità di mantenere la forma sebbene sia allungato. La presenza di domini rigidi stirenici e blocchi butadienici gommosi conferisce all'SBS le proprietà elastomeriche ma anche un'ottima processabilità, a differenza di altre gomme che richiedono invece una reticolazione tramite vulcanizzazione. Un'ulteriore conseguenza della presenza dell'anello benzenico, nella struttura di questo elastomero, è la spiccata affinità che mostra nei confronti di solventi aromatici. Questa affinità è fondamentale per assicurare una certa compatibilità con il bitume che nella sua componente maltenica può disporre di un certo quantitativo di oli aromatici. Infatti, il bitume, da un punto di vista chimico-strutturale, è costituito da una fase continua maltenica, costituita da oli aromatici e resine, in cui sono disperse le micelle di asfaltini. Grazie a questa componente aromatica è possibile una efficace miscelazione del polimero SBS al bitume. Quest'ultimo deve, infatti, impartire elevate prestazioni al bitume arrivando quasi ad invertirne la fase: aumentando il dosaggio di polimero si passa da una matrice di bitume in cui sono disperse poche molecole di polimero ad una struttura formata per quasi il 50% da catene polimeriche, grazie all'interazione tra il polimero e la parte maltenica del bitume che determina un significativo rigonfiamento del

polimero. La rete costituita dal polimero si rigonfia ma mantiene le sue caratteristiche, che si riflettono sulle proprietà del bitume. Il prodotto così ottenuto, pur conservando tutte le proprietà leganti della fase bituminosa, acquisisce le caratteristiche reologiche e prestazionali del polimero. La miscibilità è garantita non solo dall'affinità chimica tra SBS e componenti del bitume, ma anche dalle condizioni di miscelazione. Sarebbe infatti impossibile processare bitume e SBS a temperatura ambiente, in quanto non si darebbe modo al polimero di "rigonfiarsi" ed interagire con la parte maltenica del bitume. Inoltre, il polimero viene miscelato con il bitume puro per mezzo di mescolatori ad alto gradiente di taglio che ne consentono l'omogenea dispersione all'interno della massa. Tale metodo di modifica è noto come metodo "wet" ed il legante risultante viene spesso indicato con l'acronimo PMB (Polymer Modified Bitumen).

2.2 Miscele bituminose modificate con compound polimerici

I polimeri plastomerici non modificano in maniera significativa la risposta elastica del bitume ma ne determinano un sostanziale incremento della sollecitazione a rottura. Il compound oggetto di studio è un prodotto costituito da granuli semi-morbidi e flessibili formati da miscele di polimeri plastomerici con basso peso molecolare e medio punto di fusione che si aggiungono direttamente nel mescolatore durante la produzione (tecnologia PMA – Polymer Modified Asphalt) e migliorano le prestazioni fisico-meccaniche dei conglomerati bituminosi.

In generale, la principale differenza tra tecnologia PMB e PMA è la modalità di immissione del polimero:

- Se il polimero viene aggiunto al bitume puro subito dopo il processo di raffinazione si ottiene il Polymer Modified Bitumen (PMB);
- Se l'additivo viene aggiunto agli aggregati durante la produzione del conglomerato bituminoso si ottiene il Polymer Modified Asphalt (PMA). Tale metodo di modifica è anche noto come metodo "dry".

La tecnologia PMB è stata molto utilizzata nel corso degli anni ma recentemente sta sempre più prendendo piede la nuova PMA. La modifica PMA può essere chimica mediante l'uso di specifici polimeri a bassa fusione oppure fisica per mezzo di fibre specifiche. I compound e/o fibre vengono aggiunti nel miscelatore dell'impianto di produzione dopo aver inserito gli aggregati e immediatamente prima dell'aggiunta

del bitume (Figura 2.2). La quantità di polimeri in aggiunta è circa il 4/6% del peso del bitume.

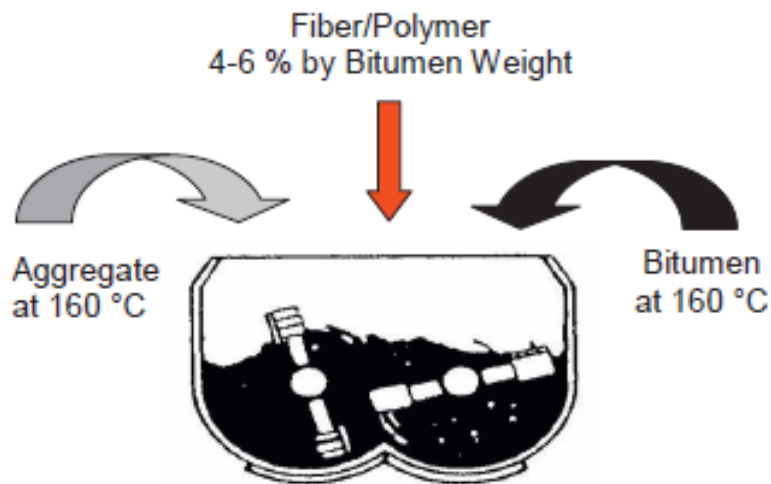


Figura 2.2 – Modalità di miscelazione della tecnologia PMA

La tecnologia PMB ha bisogno di due differenti impianti: l'impianto di modifica del bitume e l'impianto di produzione del conglomerato. Il primo serve a miscelare il bitume normale proveniente dalla raffineria con gli agenti modificanti mentre il secondo ha il compito di produrre il conglomerato bituminoso finale. Il bitume modificato deve essere trasportato dall'impianto di modifica a quello della produzione con camion dotati di miscelatori che mantengono la temperatura alta a circa 180°C e depositato in serbatoi di stoccaggio anche essi dotati di dispositivi di miscelazione che mantengono la stessa temperatura. Questa condizione deve essere mantenuta fino a che il PMB è aggiunto all'aggregato nell'impianto di produzione e poi spedito fino al sito di costruzione della strada.

La tecnologia PMA, in questo senso, risulta essere più semplice. Essa richiede solo un impianto il quale ha il compito di mescolare il bitume, gli aggregati e i compound polimerici tutti insieme, senza la necessità di mantenere una alta temperatura del bitume o utilizzare mescolatori durante il periodo di stoccaggio, evitando il rischio di separazione dei polimeri. Inoltre, la concentrazione di polimeri può essere facilmente modificata per ottimizzare la miscela (Figura 2.3).

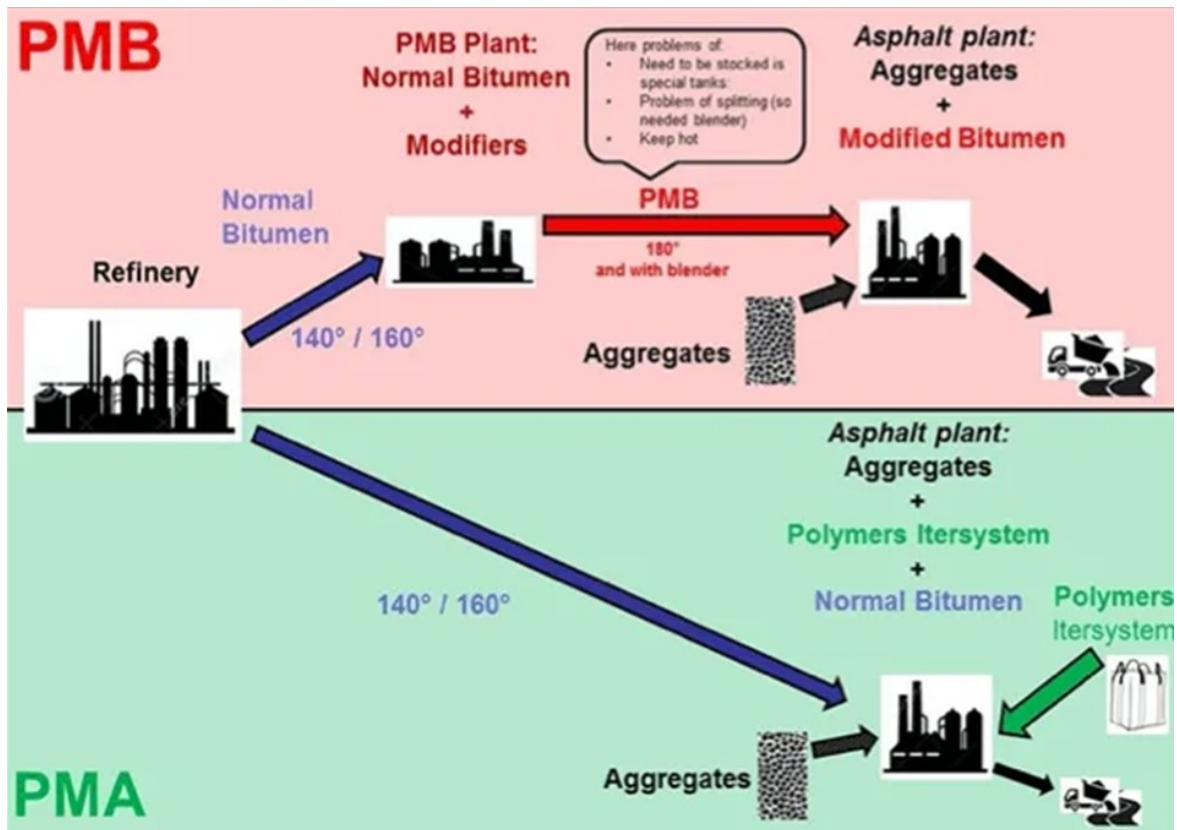


Figura 2.3 – Differenze tra tecnologie PMB e PMA

I benefici della tecnologia PMA sono:

- Miglioramento delle performance;
- Processo di produzione del conglomerato tendenzialmente più veloce e facile rispetto alla tecnologia PMB;
- Nessun rischio di separazione dei polimeri (fenomeno che può verificarsi nel caso dei PMB);
- Nessun serbatoio di stoccaggio del bitume modificato (necessario per i PMB).

Questo processo è veloce, affidabile ed efficace e con esso i costi possono diminuire di circa il 30% grazie al minore costo dei polimeri, alla minore energia usata per il mantenimento della temperatura e al minore costo logistico dei trasporti. Inoltre, la produzione di PMA è molto flessibile: può avvenire in qualsiasi momento al grado di modifica richiesto. Ciò consente di massimizzare l'efficienza e la produttività dell'impianto di produzione del conglomerato.

I benefici del PMA a livello prestazionale sono il miglioramento della resistenza all'ormaiamento, la diminuzione delle fessure dovute alle escursioni termiche e il miglioramento della durabilità della pavimentazione.

3 Indagine sperimentale

L'obiettivo della sperimentazione condotta è quello di confrontare, attraverso prove di laboratorio, l'omogeneità delle caratteristiche meccaniche di provini di conglomerato bituminoso con bitume modificato SBS e provini di conglomerato bituminoso confezionato con compound polimerici, provenienti dallo strato di base di un tronco sperimentale in vera grandezza.

Il tronco sperimentale è stato realizzato sulla complanare di accesso all'Area di servizio Prenestina Est. Le aree di intervento sono 100 x 5 m² per le miscele di tipo SBS HARD e 100 x 5 m² per le miscele con compound polimerico.

L'indagine sperimentale ha previsto due diversi tipi di prove di laboratorio effettuate mediante l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester):

- Misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- Prova di fatica a trazione indiretta (ITFT). Prima di eseguire le prove ITFT, per ogni provino è stato nuovamente misurato il modulo di rigidezza a trazione indiretta.

3.1 Programma sperimentale

La sperimentazione ha l'obiettivo di confrontare, per le due miscele studiate, l'omogeneità dei risultati ottenuti dalle prove di laboratorio di ITSM e ITFT effettuate attraverso l'apparecchiatura NAT in dotazione presso il laboratorio di "Strade e Trasporti" del "Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura" dell'Università Politecnica delle Marche. Il presente studio è frutto di una collaborazione con la società Autostrade per l'Italia.

Dalla società Autostrade sono state inviate due serie di provini di conglomerato bituminoso relativi allo strato di base: una serie con bitume modificato SBS (provini serie B) e l'altra con compound polimerici (provini serie A). I provini, di forma cilindrica, sono stati ricavati dopo l'opportuno taglio delle rispettive carote prese dal tronco sperimentale in esame (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Provini cilindrici oggetto di tesi

Prima di tutto su di essi sono stati segnati con un pennarello due diametri in modo che essi fossero perpendicolari (D_1 e D_2). Di conseguenza, con un calibro, sono stati misurati i diametri stessi e gli spessori (h_1 , h_2 , h_3 , h_4) in corrispondenza degli estremi di questi diametri in modo da caratterizzare la geometria di ciascun provino tramite le medie (D_m e h_m).

Nelle seguenti tabelle (Tabelle 3.1 e 3.2) si riportano le caratteristiche geometriche dei provini. È possibile notare che i provini 1A, 2A e 3A hanno un diametro maggiore rispetto agli altri e pari a 149 mm, mentre tutti gli altri provini hanno un diametro di 144 mm. Inoltre, i provini 7B e 10B sono arrivati in laboratorio già rotti (per via delle operazioni di carotaggio, taglio e/o trasporto) e dunque non è stato possibile testarli.

Provino		D1	D2		h1	h2	h3	h4		Media D	Media h
1A		149	149		39	39	39	39		149	39
2A		149	149		42	40	40	42		149	41
3A		149	149		42	42	41	43		149	42
4A		144	144		41	41	41	40		144	40,75
5A		144	144		41	41	40	41		144	40,75
6A		144	144		40	41	40	40		144	40,25
7A		144	144		40	40	40	40		144	40
8A		144	144		42	42	42	42		144	42
9A		144	144		42	43	42	44		144	42,75
10A		144	144		39	36	38	38		144	37,75

Tabella 3.1 – Dimensioni provini serie A

Provino		D1	D2		h1	h2	h3	h4		Media D	Media h
1B		144	144		40	41	41	40		144	40,5
2B		144	144		42	41	40	40		144	40,75
3B		144	144		42	43	43	43		144	42,75
4B		144	144		41	41	41	40		144	40,75
5B		144	144		38	40	39	38		144	38,75
6B		144	144		44	45	44	44		144	44,25
7B	rotto	\	\								
8B		144	144		41	41	40	40		144	40,5
9B		144	144		62	61	61	61		144	61,25
10B	rotto	\	\								

Tabella 3.2 – Dimensioni provini serie B

3.2 Materiali

I materiali presi in considerazione e testati tramite le prove di laboratorio sono di due tipi: i provini della serie A sono costituiti da conglomerato bituminoso prodotto con compound polimerici aggiunti direttamente nel mixer insieme ad aggregati e bitume tradizionale; i provini della serie B sono costituiti da conglomerato bituminoso il cui

legante è un bitume modificato con polimero SBS (la miscela attualmente di riferimento a livello autostradale).

Durante la realizzazione del tronco sperimentale, le miscele sfuse sono state prelevate per essere sottoposte a prove di estrazione per la determinazione della granulometria e della percentuale di bitume, effettuate secondo la UNI EN 12697-1 presso il laboratorio Autostrade. Di seguito si riporta la tabella con i risultati ottenuti (Tabella 3.3).

Determinazione del contenuto di legante (UNI EN 12697-1)

Risultante granulometrica	% passanti				
	BASE HARD	BASE Tal quale + Compound	Curva Di progetto SALES	Fuso - ASPI	
Set.					
31,5	100	100,0	100	100	100
20	94,3	89	85,7	73	94
14	77,1	61	64,8	51	76
10	68,6	51	57	40	64
6,3	58,4	41,9	43,1	31	55
2	32	23,3	23,1	19	38
0,5	13,2	10,9	12,2	8	21
0,25	8,6	8,0	9,2	5	16
0,063	4,9	5,9	4	4	8
% BITUME (rif. Aggregati)	4,93	4,37	4,2	4	5,5

Tabella 3.3 - Granulometria e contenuto di legante delle miscele studiate

La colonna "BASE HARD" si riferisce alla miscela con bitume modificato SBS HARD mentre la colonna "BASE tal quale + compound" si riferisce alla miscela con compound polimerico. Come si può notare dalla Tabella 3.3, la granulometria e la percentuale di bitume delle due miscele sono diverse, sebbene il mix design di progetto sia lo stesso. Tale discrepanza è molto probabilmente legata alle fasi di produzione delle miscele in impianto. Per tale motivo, il solo confronto davvero significativo tra le miscele è quello legato all'omogeneità prestazionale. L'obiettivo è quello di valutare se il metodo di modifica dry, in cui i compound polimerici sono

miscelati per pochi secondi con gli aggregati ed il bitume, garantisce un'omogeneità del conglomerato finale comparabile con il metodo di modifica wet.

3.3 Proprietà volumetriche e resistenza a trazione indiretta

Le carote prelevate dalla stesa sperimentale autostradale sono state tagliate in due parti: una è stata utilizzata per l'analisi volumetrica e per determinare la resistenza a trazione indiretta, mentre l'altra è stata inviata al laboratorio di "Strade e Trasporti" dell'Università Politecnica delle Marche.

Pertanto, i dati presentati nelle seguenti tabelle (Tabelle 3.4 e 3.5) non sono riferiti ai provini testati presso il laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche, bensì ai provini testati dal laboratorio prove di Autostrade. Tuttavia, è lecito ritenere che questi risultati siano validi anche per i provini testati presso il laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche, oggetto della sperimentazione descritta in questa tesi.

La determinazione dei vuoti è stata eseguita seguendo la norma UNI EN 12697-8. Il provino viene prima pesato in aria, poi viene rivestito di paraffina per sigillare superficialmente i vuoti del provino. Si determina quindi il peso del provino paraffinato e, per differenza, il peso di paraffina (e di conseguenza il volume della paraffina, essendo nota la sua densità). Successivamente il provino paraffinato viene pesato in acqua, ricavando il volume del provino sfruttando il principio di Archimede sulla spinta idrostatica. Si ricava così la massa volumica del provino, ovvero il rapporto peso/volume. Con questi dati è possibile ricavare i vuoti residui con la seguente formula:

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

dove:

V_m = contenuto dei vuoti residui (%);

ρ_m = massa volumica massima della miscela (kg/m³);

ρ_b = massa volumica apparente totale della miscela (kg/m³).

La resistenza a trazione indiretta è stata determinata seguendo la norma UNI EN 12697-23. Il provino cilindrico da testare viene portato alla temperatura di prova specificata, posto nella macchina di prova di compressione tra le strisce di carico e caricato diametralmente lungo la direzione dell'asse del cilindro con una velocità di spostamento costante fino a rottura. La configurazione di prova è illustrata in Figura 3.2.

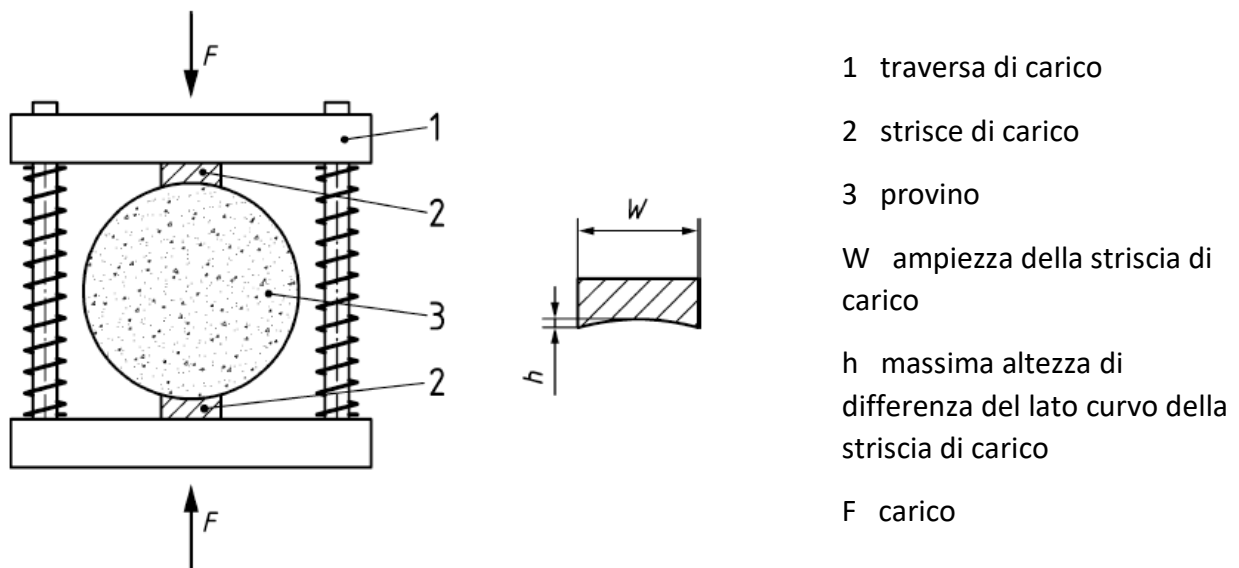


Figura 3.2 — Configurazione della prova di resistenza a trazione indiretta e particolare della striscia di carico

La resistenza a trazione indiretta del provino si calcola con la seguente formula:

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

dove:

RT = resistenza a trazione indiretta (MPa);

P = carico di picco (N);

D = diametro del provino (mm);

H = altezza del provino (mm).

Le Tabelle 3.4 e 3.5 mostrano:

- il peso del provino in aria;
- il peso del provino paraffinato;
- il peso della paraffina usata;
- il volume della paraffina usata;
- il peso del provino in acqua;
- il volume del provino;
- il rapporto peso/volume;
- la percentuale di vuoti;
- la resistenza a trazione indiretta;
- il coefficiente di trazione indiretta (determinabile dai risultati della prova di resistenza a trazione indiretta).

Strato di base - Hard										
Carota N°	Peso in Aria	Peso Paraffinato	Peso par.	Volume par.	Peso in acqua	Volume	P/V	% vuoti	RT(MPa)	CTI(MPa)
1b	1934	1958	24	28,8	1105	824,22	2,35	6,48	0,79	53,00
2b	955	999	44	52,8	530	416,24	2,29	8,56	0,39	36,00
3b	1607	1644	37	44,4	908	691,64	2,32	7,39	0,62	53,00
4b	1822	1861	39	46,8	1025	789,24	2,31	7,99	0,64	44,00
5b	886	901	15	18,0	506	377,01	2,35	6,34	0,54	24,00
6b	N.A	N.A	N.A.	N.A.	N.A.					
7b	N.A	N.A	N.A.	N.A.	N.A.					
8b	695	708	13	15,6	403	289,41	2,40	4,29	0,52	33,00
9b	N.A	N.A	N.A.	N.A.	N.A.					
10b	N.A	N.A	N.A.	N.A.	N.A.					

Tabella 3.4 – Analisi volumetrica e resistenza a trazione indiretta dei provini serie B

Strato di base - Tal quale + compound										
Carota N°	Peso in Aria	Peso Paraffinato	Peso par.	Volume par.	Peso in acqua	Volume	P/V	% vuoti	RT(MPa)	CTI(MPa)
1a	2334	2368	34	40,8	1324	1003,2	2,33	6,90	0,72	47,00
2a	2035	2070	35	42,0	1141	887,0	2,29	8,20	0,66	48,00
3a	2289	2316	27	32,4	1315	968,6	2,36	5,44	0,79	65,00
4a	2205	2224	19	22,8	1276	925,2	2,38	4,63	0,68	64,00
5a	1832	1869	37	44,4	1041	783,6	2,34	6,45	0,66	51,00
6a	1566	1593	27	32,4	895	665,6	2,35	5,86	0,74	59,00
7a	2331	2354	23	27,6	1339	987,4	2,36	5,53	0,75	45,00
8a	1313	1329	16	19,2	753	556,8	2,36	5,64	0,78	60,00
9a	1337	1357	20	24,0	759	574,0	2,33	6,80	0,74	55,00
10a	1780	1816	36	43,2	1017	755,8	2,36	6,14	0,72	61,00

Tabella 3.5 – Analisi volumetrica e resistenza a trazione indiretta dei provini serie A

Dalle tabelle precedenti è possibile osservare che, in termini di resistenza a trazione indiretta, la dispersione sembra maggiore nel caso dei provini con bitume SBS.

3.4 Prove di modulo a trazione indiretta (ITSM)

Le prove per la determinazione del modulo di rigidità a trazione indiretta (ITSM, Indirect Tensile Stiffness Modulus) sono state effettuate in accordo con la UNI EN 12697-26 (Annesso C) utilizzando l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester) presso il laboratorio "Strade e Trasporti" dell'Università Politecnica delle Marche.

Le componenti fondamentali del NAT sono (Figura 3.3):

- La struttura di carico, costituita da una base, due montanti, una trave di contrasto regolabile, un attuatore pneumatico;
- L'unità pneumatica;
- Il sistema computerizzato di acquisizione e controllo dati;
- La camera climatica.

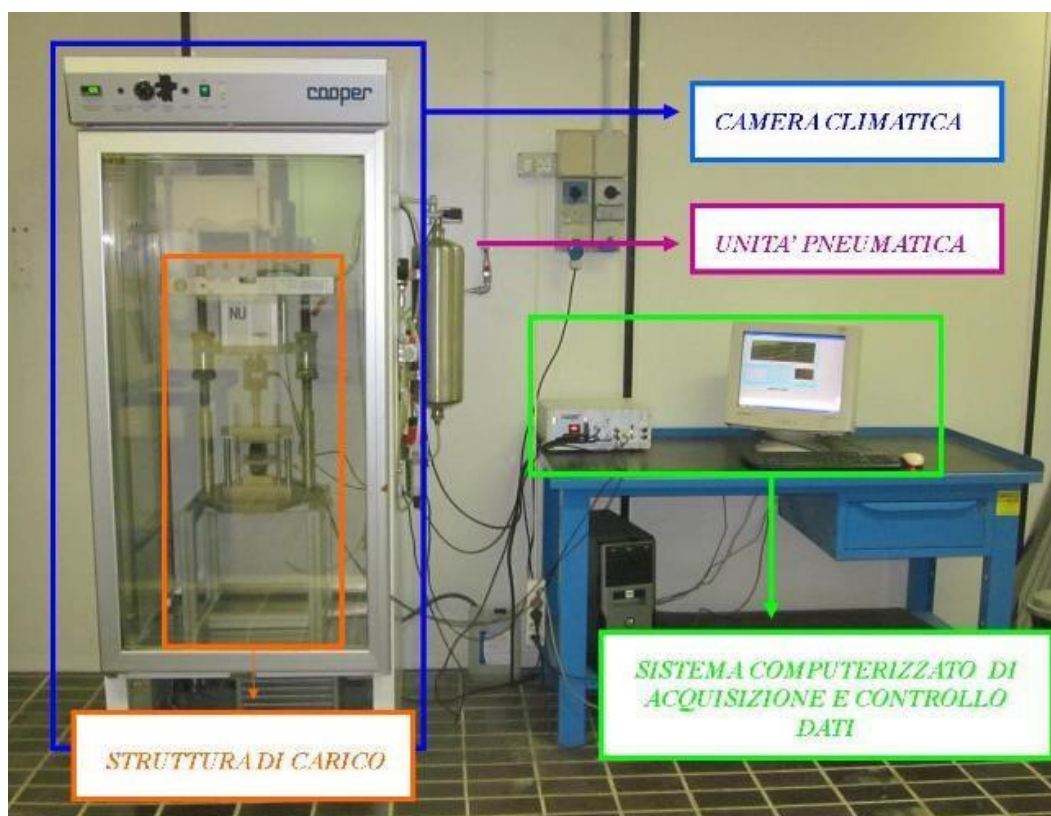


Figura 3.3 – Apparecchiatura NAT

Il modulo di rigidezza a trazione indiretta è funzione della geometria del campione, della deformazione orizzontale e del coefficiente di Poisson. In generale, le prove di modulo eseguibili sono di due tipi: a tensione controllata e a deformazione controllata. Nel caso in esame è stata utilizzata la configurazione a deformazione controllata.

La prova consiste nell'applicazione dinamica di un carico lungo il diametro verticale di un provino cilindrico e nella misurazione della deformazione lungo il piano diametralmente ortogonale. Il carico verticale induce nel provino sia tensioni verticali di compressione, sia tensioni orizzontali di trazione. Le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) e y (compressione), in corrispondenza del diametro orizzontale, sono date dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_x(max) = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \cdot \sigma_x(media)$$

$$\sigma_y(max) = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \cdot \sigma_y(media)$$

$$\sigma_x(media) = \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_y(media) = \frac{-P}{d \cdot t}$$

Dove:

- P è il carico applicato;
- d è il diametro del provino;
- t è lo spessore del provino.

La deformazione orizzontale del provino è:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x(\text{media})}{E} + \nu \cdot \frac{\sigma_y(\text{media})}{E}$$

Dove:

- ν è il Coefficiente di Poisson;
- E è il modulo elastico del materiale.

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, tenuto conto che la deformazione orizzontale dei campioni (Δ) si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del provino, si ottiene:

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

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale, come indicato nella seguente equazione:

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

Gli accessori che servono per l'allestimento del provino sono (Figura 3.4 e 3.5):

- Telaio di carico principale;
- Telaio porta trasduttori;
- Trasduttori (LVDT Linear Variable Displacement Transducer).

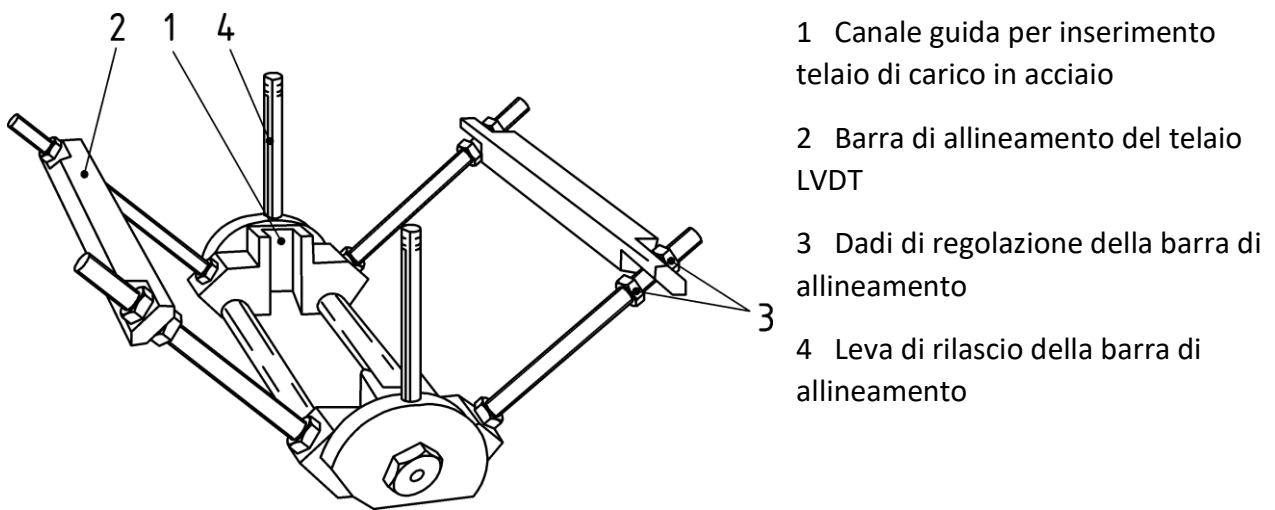


Figura 3.4 – Telaio di carico principale

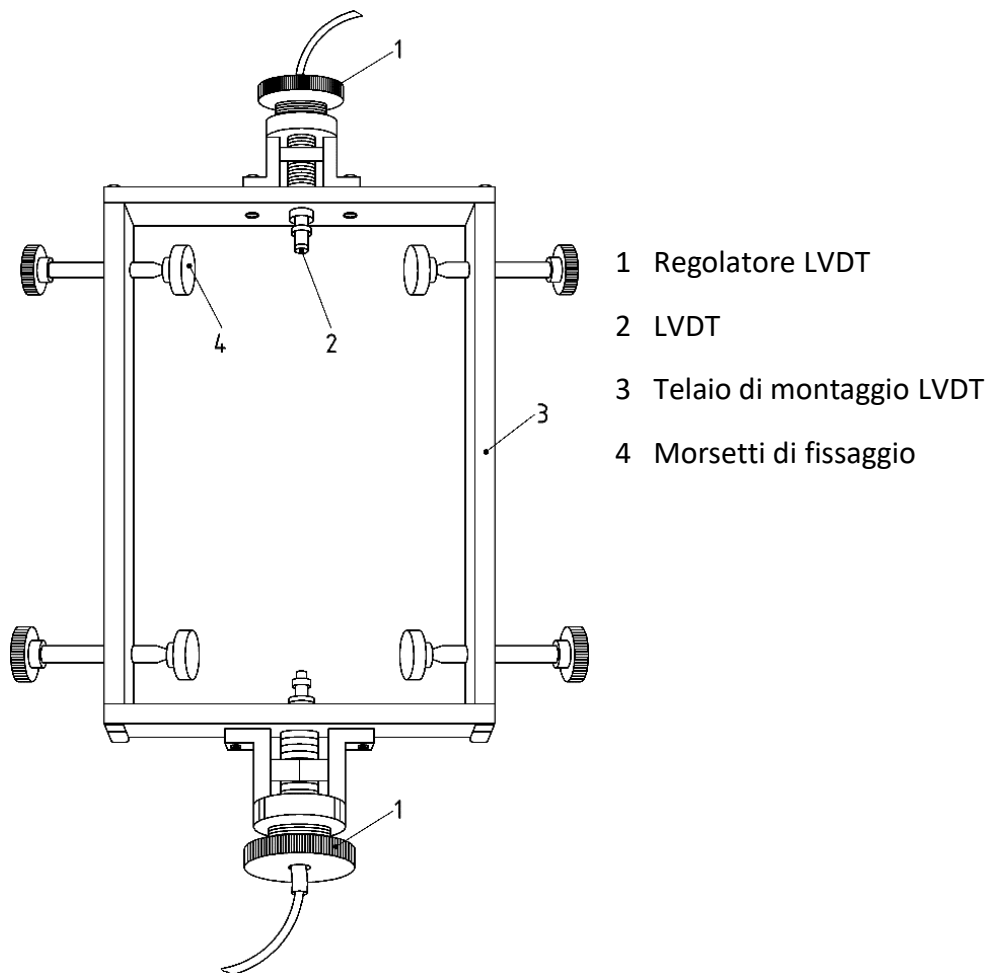


Figura 3.5 – Telaio porta-trasduttori

Prima di iniziare ogni procedura però il provino deve essere condizionato in camera climatica ad una temperatura prestabilita per almeno 24 ore. Nella presente sperimentazione la temperatura di prova è stata scelta pari a 25°C.

Il provino, una volta estratto dalla camera climatica, viene posizionato sul telaio principale in modo da centrarlo il più possibile, con le leve laterali abbassate così da far appoggiare il provino sulle barre laterali e non sul listello inferiore. Successivamente si posiziona il telaio porta-trasduttori, che viene fissato al provino tramite i morsetti stringendo le viti. Quindi si posiziona la traversa di carico e si alzano le leve laterali per evitare che il provino tocchi le barre laterali ma poggi solamente sulla barra inferiore. Il provino così assemblato viene spostato nella camera climatica dell'apparecchiatura NAT senza però collocarlo sotto il pistone di carico dell'attuatore.

A questo punto si accede al software ITSM nel computer che controlla il NAT. Per prima cosa bisogna nominare il file che sarà salvato nel pc, ad esempio "*p(n°provino)_ITSM_25C*". Di seguito compare una schermata dove inserire in input i seguenti dati (Figura 3.6):

- Temperatura di prova;
- Diametro provino in mm;
- Spessore provino in mm;
- Coefficiente di Poisson;
- Rise-time;
- Deformazione orizzontale in μm ;
- Numero di impulsi di condizionamento.

Nella sperimentazione descritta sono stati considerati i seguenti parametri per tutti i provini: temperatura pari a 25°C, come già precedentemente detto; coefficiente di Poisson pari a 0,35 , come prescritto dalla norma di riferimento; rise-time pari a 124 ms; deformazione orizzontale di 7 μm ; numero di impulsi di condizionamento pari a 10.

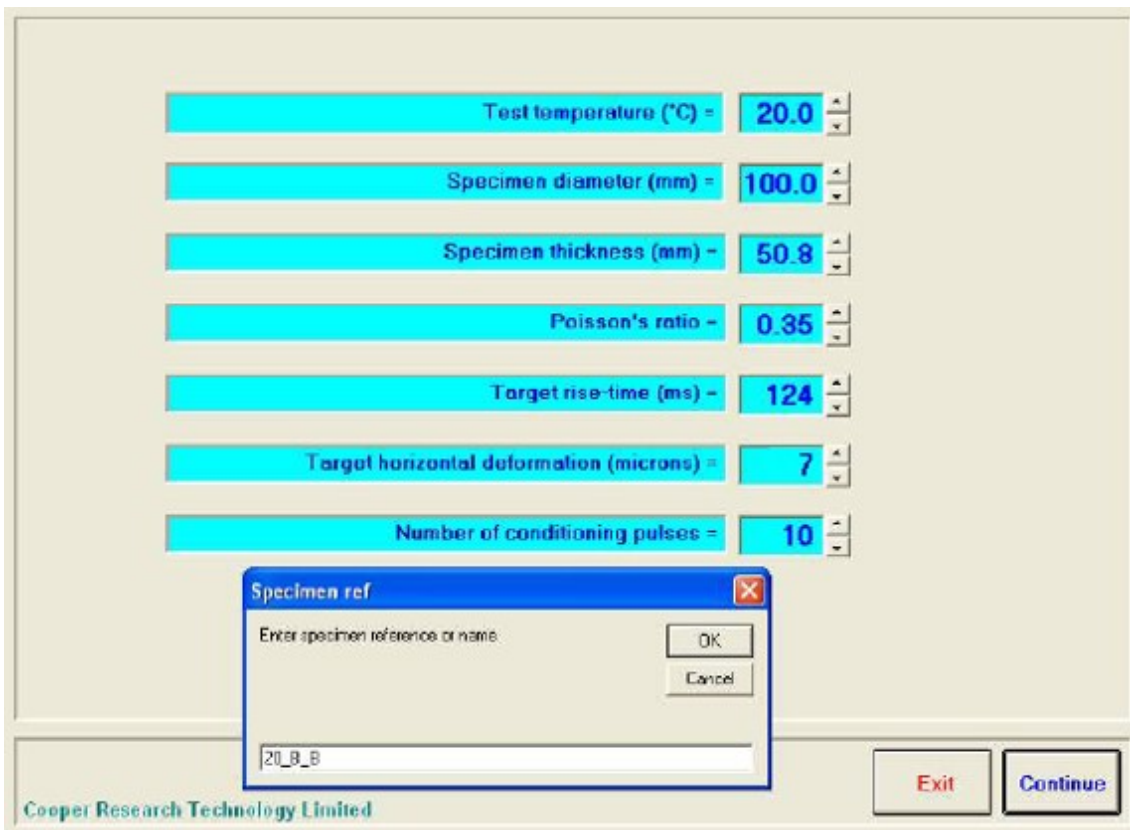


Figura 3.6 – Schermata tipo del software per l'immissione dei dati di input della prova ITSM

Il rise-time, o tempo di picco, è il tempo necessario al carico pulsante per raggiungere il suo valore di picco (Figura 3.7).

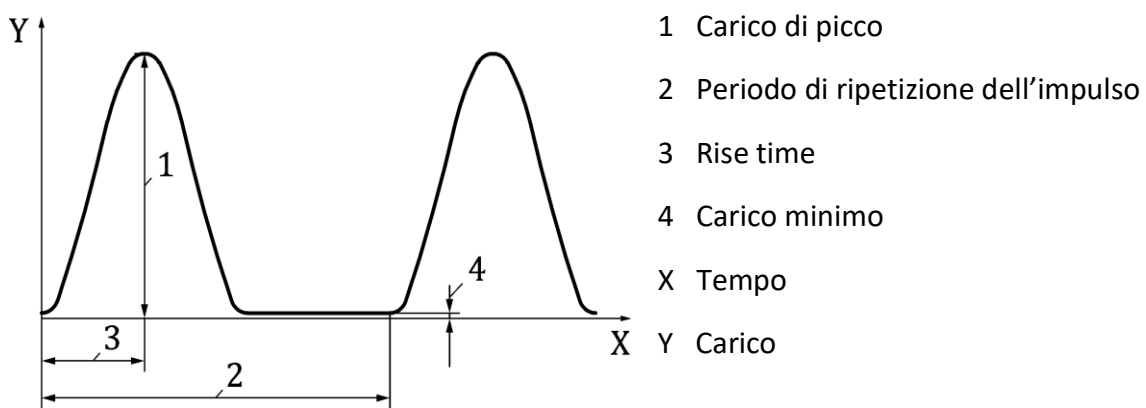


Figura 3.7 – Curva di carico

A questo punto il provino assemblato viene posizionato esattamente sotto l'attuatore.

La configurazione di prova è mostrata in Figura 3.8.

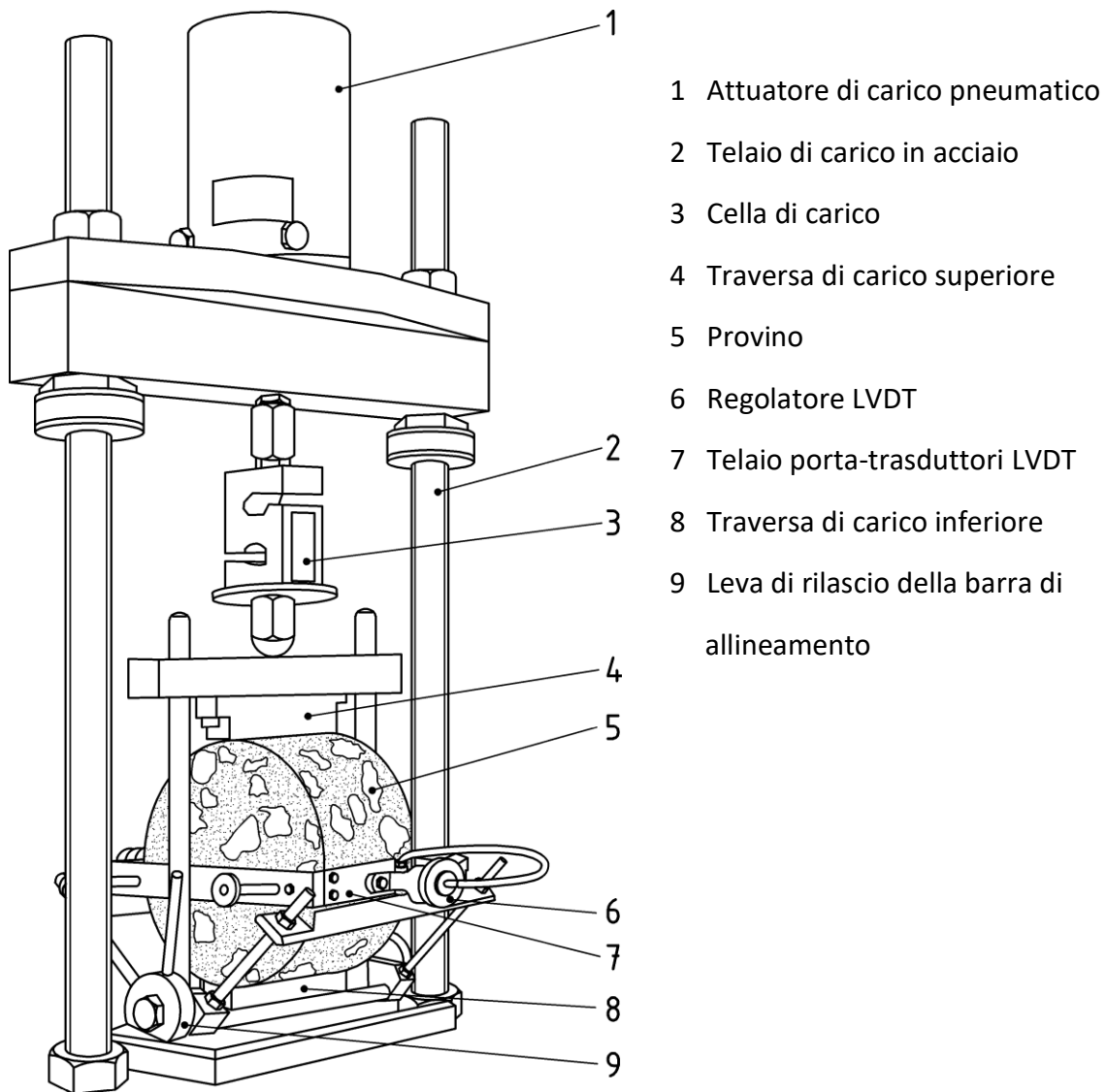


Figura 3.8 – Configurazione della prova ITSM

La schermata attraverso la quale si può regolare la posizione del pistone di carico è mostrata in Figura 3.9.

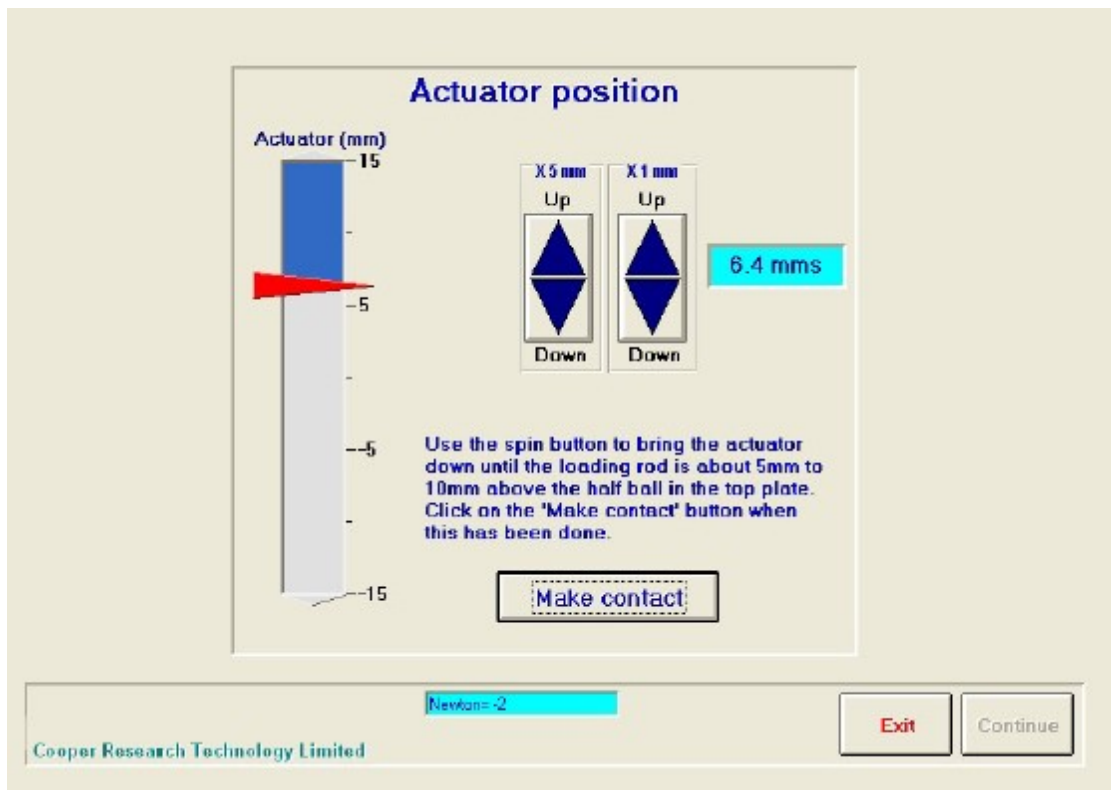


Figura 3.9 – Schermata tipo del software per regolare la posizione del pistone di carico della prova ITSM

Cliccando su “make contact” l’attuatore della cella di carico imprime un piccolo carico alla mezzasfera d’acciaio sopra la traversa di carico superiore così da garantire il contatto con il provino. Una volta avvenuto il contatto, si devono posizionare i trasduttori nel telaio porta-trasduttori e regolarli tramite le viti micrometriche regolatrici in modo che le frecce nella schermata per il posizionamento dei LVDT diventino rosse (Figura 3.10).

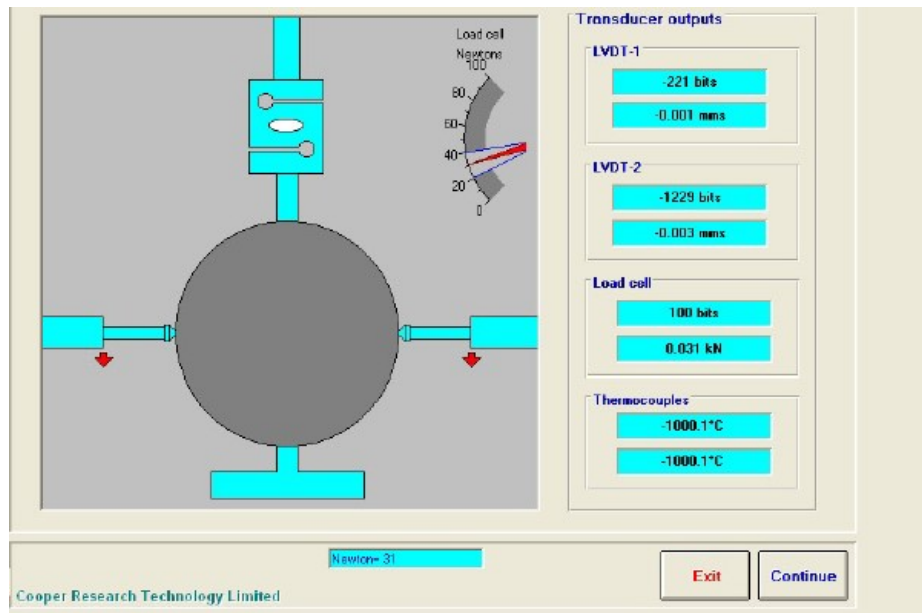


Figura 3.10 – Schermata tipo del software per il posizionamento dei LVDT

L'allestimento ora risulta completo e si può iniziare la prova.

Prima del test vero e proprio il sistema applica i 10 impulsi di pre-condizionamento per stabilire il carico adeguato a far deformare il provino secondo la deformazione orizzontale imposta.

La prova consiste nell'applicazione di 5 impulsi distanziati tra loro. I risultati vengono visualizzati in tempo reale sulla schermata del pc. Inoltre, il software calcola in automatico anche la media delle 5 misurazioni effettuate. Per ogni misurazione è possibile visualizzare un grafico che rappresenta la curva di carico (rossa) e la curva di deformazione (azzurra), come mostrato in Figura 3.11.

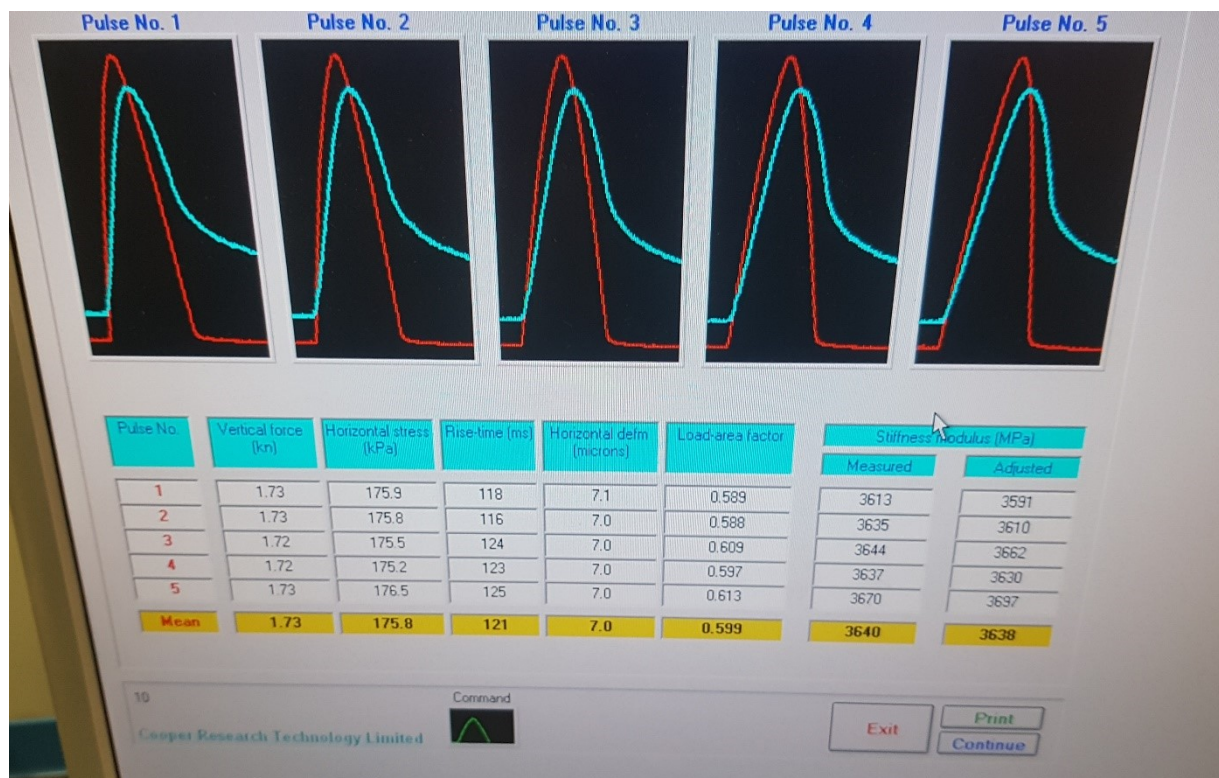


Figura 3.11 – Schermata tipo del software con i risultati di prova

Se i valori di rise-time non ricadono nell'intervallo $124\text{ms} \pm 4\text{ms}$ o il valore di deformazione orizzontale è fuori dal range $7\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$, il valore di modulo riferito a quella misurazione deve essere escluso dal valore medio riferito al provino. Inoltre, il programma fornisce due valori di modulo di rigidezza: misurato (measured) e aggiustato (adjusted); in questa sperimentazione è stato preso in considerazione il valore di modulo aggiustato.

Andando avanti il software chiede di riallestire il provino (seguendo le procedure fatte in precedenza), stavolta ruotato di 90° per misurare il modulo sul diametro perpendicolare. Al termine di questa seconda prova, se il valore medio del modulo misurato sul secondo diametro risulta inferiore rispetto al modulo ottenuto sul primo diametro con una differenza maggiore del 20% oppure risulta superiore rispetto al modulo ottenuto sul primo diametro con una differenza maggiore del 10%, i risultati non possono considerarsi attendibili e la prova deve essere ripetuta.

Il valore di modulo che si considera identificativo per il provino esaminato è quello medio tra i due valori ottenuti per le due diagonali.

3.5 Prove cicliche a fatica (ITFT)

Le prove cicliche a fatica (ITFT, Indirect Tensile Fatigue Test) sono state eseguite in accordo alla UNI EN 12697-24 attraverso l'uso dell'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester) presso il laboratorio "Strade e Trasporti" dell'Università Politecnica delle Marche sugli stessi provini precedentemente sottoposti alle prove ITSM.

La prova ITFT consiste nell'applicazione ripetuta di un carico lungo il diametro verticale che sviluppa una sollecitazione a trazione relativamente uniforme, perpendicolare alla direzione del carico applicato, che causa la rottura del provino mediante spaccatura lungo la parte centrale del diametro verticale. Essa è una prova a sforzo controllato e distruttiva. Il risultato che si ottiene da questo tipo di prova è il numero di cicli di carico che il provino riesce a sopportare prima di giungere a rottura.

L'accessorio che serve per l'allestimento del provino è solamente il telaio di carico principale (Figura 3.12). Infatti, nonostante solitamente si utilizzano i trasduttori per la misurazione della deformazione orizzontale, nella sperimentazione in esame non sono stati adoperati. Il provino viene posizionato sul telaio principale in modo da centrarlo il più possibile, si inserisce la traversa di carico superiore e si colloca il provino così assemblato dentro la camera climatica del NAT ma non sotto l'attuatore.



Figura 3.12 – Telaio di carico della prova ITFT

Prima di effettuare questa prova, per ogni provino sono stati misurati nuovamente i moduli di rigidezza tramite la prova ITSM. Tali moduli sono indicati nel seguito come moduli “pre-fatica”.

Per l’esecuzione della prova si considerano le fasi descritte di seguito. Prima di iniziare la prova, il provino deve essere condizionato in camera climatica ad una temperatura prestabilita per almeno 24 ore. Nella sperimentazione in oggetto la temperatura è stata scelta pari a 25°C.

Si accede al software ITFT presente nel computer che controlla il NAT. Per prima cosa bisogna nominare il file che sarà salvato nel pc, ad esempio “p(*n°provino*)_ITFT_25C”. Di seguito compare una schermata dove inserire i seguenti dati di input (Figura 3.13):

- Temperatura di prova;
- Diametro del provino in mm;
- Spessore del provino in mm;
- Sforzo orizzontale.

Per tutti i provini testati sono stati considerati i seguenti parametri: temperatura pari a 25°C, come già precedentemente detto; sforzo orizzontale pari a 300 kPa, scelto per avere una rottura dei provini in un tempo inferiore ad una giornata di lavoro.

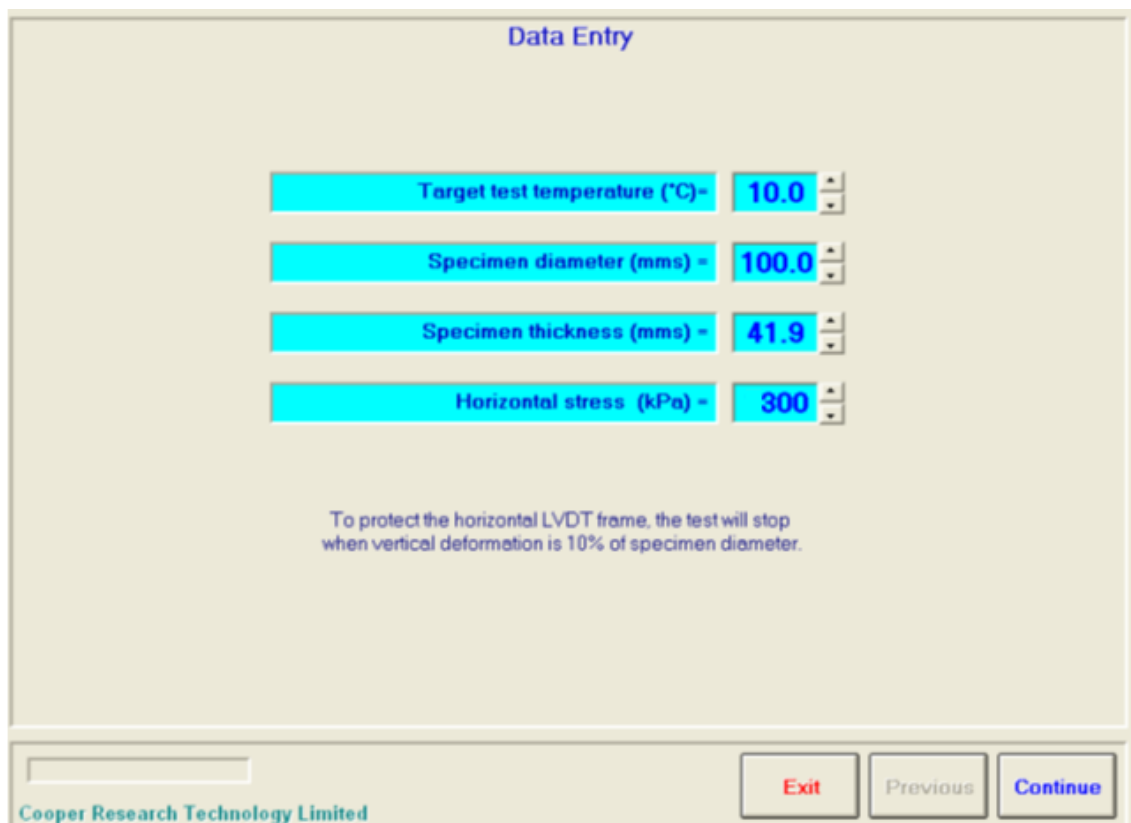


Figura 3.13 – Schermata tipo del software per l'immissione dei dati input della prova ITFT

Successivamente compare la schermata per la regolazione dei trasduttori (non utilizzati nelle prove effettuate).

Andando avanti compare la schermata mostrata in Figura 3.14. A questo punto è possibile spostare il telaio di carico con il provino e la traversa di carico superiore sotto il pistone di carico della macchina e, premendo il pulsante "Start test", si fa partire la prova.

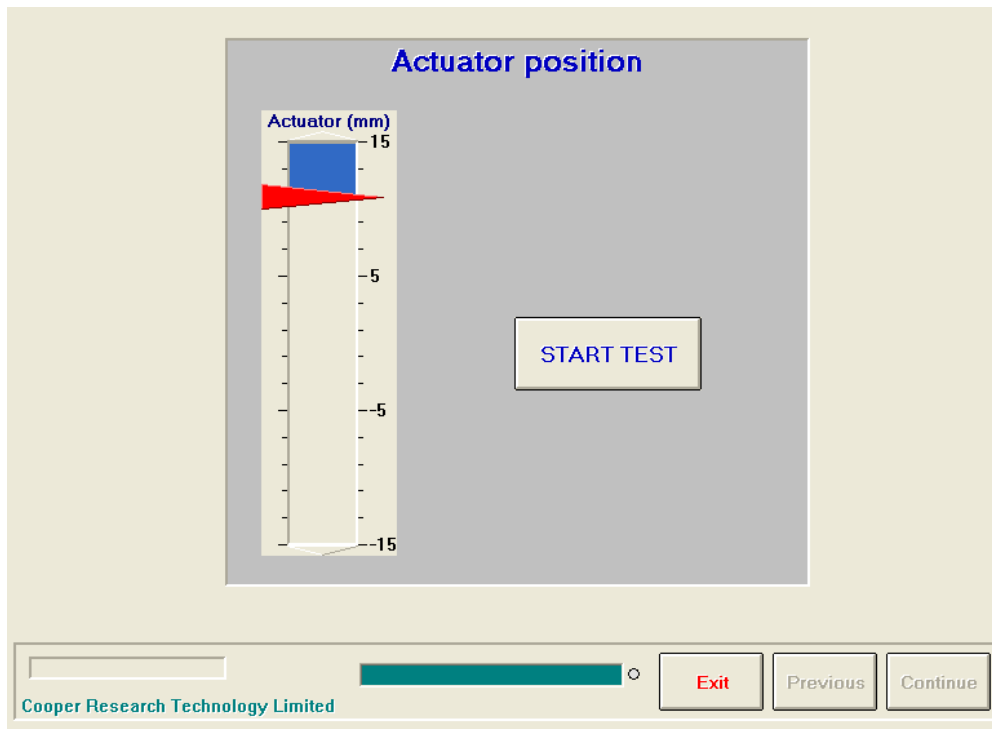


Figura 3.14 – Schermata tipo del software per la posizione dell'attuatore della prova ITFT

Durante la prova è possibile monitorare in tempo reale l'andamento di due curve che mostrano, in funzione del numero di cicli di carico applicati, le deformazioni permanenti verticali (curva azzurra) e orizzontali (curve rossa) accumulate dal provino (Figura 3.15). Si precisa nuovamente che nello studio in esame la deformazione orizzontale non è stata misurata nelle prove ITFT.

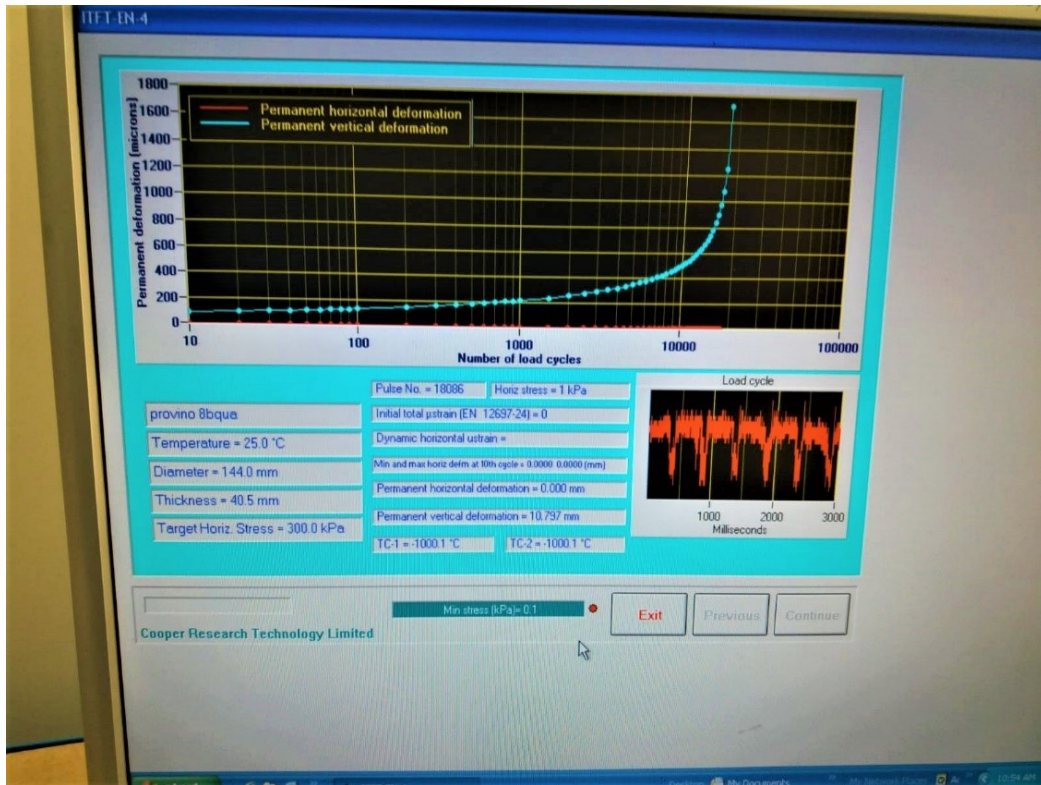


Figura 3.15 – Schermata tipo con l'evoluzione delle deformazioni durante la prova

4 Analisi dei risultati

In questo capitolo vengono presentati e commentati i risultati delle prove ITSM e ITFT effettuate presso il laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche.

4.1 ITSM

Di seguito si riportano i risultati delle prove ITSM delle due serie di provini. Vengono esaminati prima i risultati relativi alla serie A (Tabelle 4.1, 4.2, 4.3 e Figura 4.1) e poi quelli relativi alla serie B (Tabelle 4.4, 4.5, 4.6 e Figura 4.2).

Provino	Diametro (mm)	Spessore (mm)	Temperatura (°C)	Coeff. di poisson	Rigidezza misurata (MPa)	Rigidezza aggiustata (MPa)
provino 1A D1	149	39	25	0,35	3601	3630
provino 1A D2	149	39	25	0,35	3380	3383
provino 2A D1	149	41	25	0,35	2898	2920
provino 2A D2	149	41	25	0,35	2992	3000
provino 3A D1	149	42	25	0,35	3861	3903
provino 3A D2	149	42	25	0,35	3610	3604
provino 4A D1	144	40,8	25	0,35	3840	3871
provino 4A D2	144	40,8	25	0,35	3581	3591
provino 5A D1	144	40,8	25	0,35	3844	3878
provino 5A D2	144	40,8	25	0,35	3521	3537
provino 6A D1	144	40,2	25	0,35	4302	4338
provino 6A D2	144	40,2	25	0,35	4195	4223
provino 7A D1	144	40	25	0,35	3450	3490
provino 7A D2	144	40	25	0,35	3356	3369
provino 8A D1	144	42	25	0,35	5049	5065
provino 8A D2	144	42	25	0,35	4876	4882
provino 9A D1	144	42,8	25	0,35	4721	4757
provino 9A D2	144	42,8	25	0,35	4686	4676
provino 10A D1	144	37,8	25	0,35	4677	4716
provino 10A D2	144	37,8	25	0,35	4604	4584

Tabella 4.1 – Risultati prova ITSM per i provini della serie A

I valori dei moduli misurati e aggiustati riportati in Tabella 4.1 per i provini 1A D1, 1A D2, 2A D1, 2A D2, 5A D1, 6A D1, 6A D2, 8A D1, 9A D1, 9A D2, 10A D1, 10A D2, sono stati ricalcolati eliminando l'impulso il cui rise-time era fuori dall'intervallo 124 ± 4 ms.

Di conseguenza è stata calcolata la media dei moduli aggiustati rispetto ai due diametri per ogni provino con il relativo scarto quadratico medio (SQM) (Tabella 4.2).

Provino	Rigidezza aggiustata (MPa)	Media rigidezza (MPa)	SQM
provino 1A D1	3630	3507	174,66
provino 1A D2	3383		
provino 2A D1	2920	2960	56,57
provino 2A D2	3000		
provino 3A D1	3903	3754	211,42
provino 3A D2	3604		
provino 4A D1	3871	3731	197,99
provino 4A D2	3591		
provino 5A D1	3878	3708	241,12
provino 5A D2	3537		
provino 6A D1	4338	4281	81,32
provino 6A D2	4223		
provino 7A D1	3490	3430	85,56
provino 7A D2	3369		
provino 8A D1	5065	4974	129,40
provino 8A D2	4882		
provino 9A D1	4757	4717	57,28
provino 9A D2	4676		
provino 10A D1	4716	4650	93,34
provino 10A D2	4584		

Tabella 4.2 – Media dei moduli di rigidezza dei due diametri per i provini della serie A

Infine è stata calcolata la media dei moduli di tutti i provini della serie A con il relativo SQM, che è un indice utile a valutare l'omogeneità/la dispersione del comportamento meccanico dei provini (Tabella 4.3).

provino	media rigidezza	SQM
provino 1A	3507	
provino 2A	2960	
provino 3A	3754	
provino 4A	3731	
provino 5A	3708	
provino 6A	4281	
provino 7A	3430	
provino 8A	4974	
provino 9A	4717	
provino 10A	4650	
Media provini A	3971	651,754

Tabella 4.3 – Moduli di rigidezza dei provini della serie A con relativa media e SQM

Il seguente istogramma (Figura 4.1) riassume i risultati della prova ITSM per i provini della serie A. Nel grafico le barre di errore relative al singolo provino sono indicative della differenza del modulo ottenuto sui diametri D1 e D2 del provino, mentre la barra di errore relativa alla media indica la dispersione di tutta la serie.

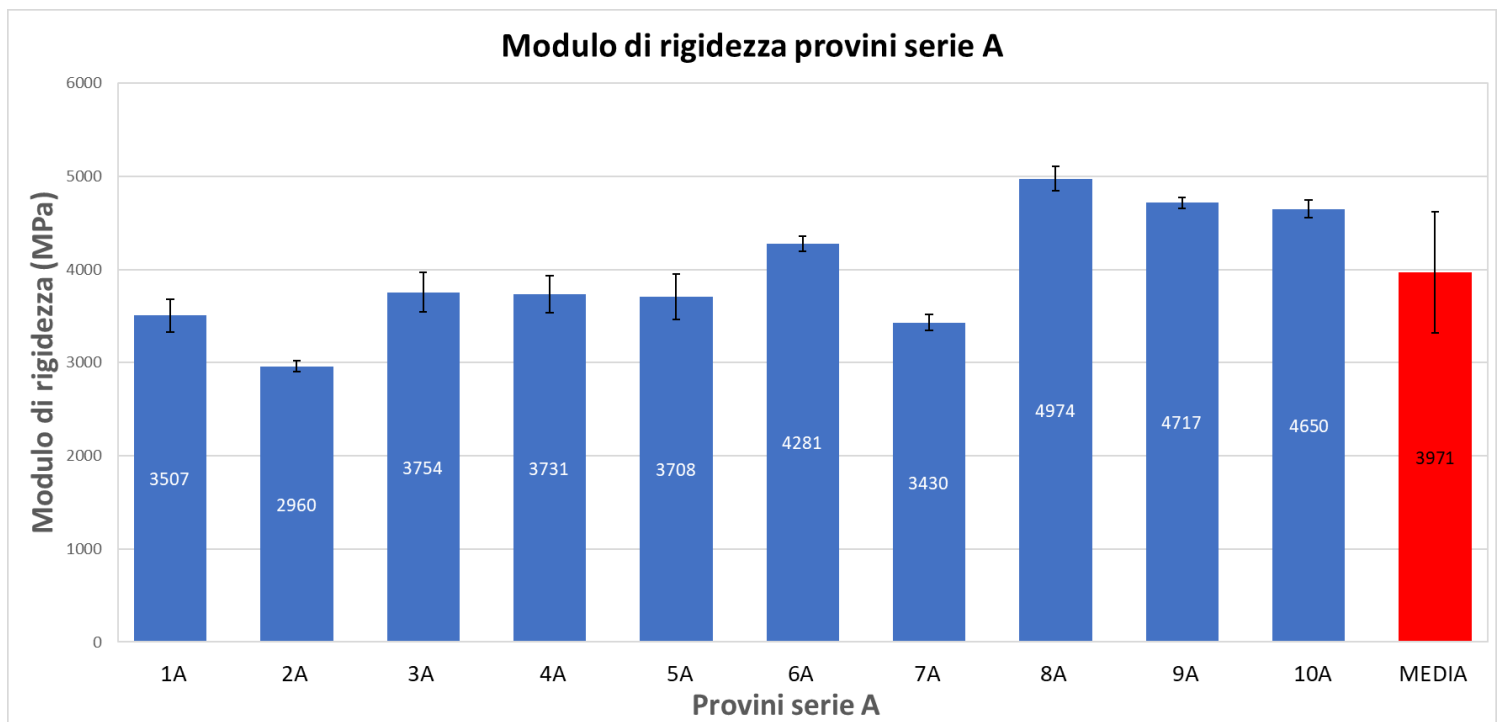


Figura 4.1 – Istogramma dei moduli di rigidezza dei provini della serie A e relativa media

Dalla Figura 4.1 si può notare che i moduli di rigidezza variano tra 2960 MPa (valore minimo) e 4974 MPa (valore massimo) con una media pari a 3971 MPa. Lo SQM relativo a tutta la serie è pari a 652 MPa, a cui corrisponde un coefficiente di variazione (rapporto percentuale tra SQM e media) pari al 16%.

Provino	Diametro (mm)	Spessore (mm)	Temperatura (°C)	Coeff.di poisson	Rigidezza misurata (MPa)	Rigidezza aggiustata (MPa)
provino 1B D1	144	40,5	25	0,35	4732	4769
provino 1B D2	144	40,5	25	0,35	4457	4446
provino 2B D1	144	40,7	25	0,35	2776	2793
provino 2B D2	144	40,7	25	0,35	2579	2582
provino 3B D1	144	42,7	25	0,35	4412	4444
provino 3B D2	144	42,7	25	0,35	3936	3950
provino 4B D1	144	40,7	25	0,35	4387	4411
provino 4B D2	144	40,7	25	0,35	4298	4298
provino 5B D1	144	38,8	25	0,35	3167	3188
provino 5B D2	144	38,8	25	0,35	3051	3048
provino 6B D1	144	44,2	25	0,35	1932	1942
provino 6B D2	144	44,2	25	0,35	1798	1805
provino 7B D1						
provino 7B D2						
provino 8B D1	144	40,5	25	0,35	4922	4948
provino 8B D2	144	40,5	25	0,35	4573	4596
provino 9B D1	144	61,2	25	0,35	2069	2079
provino 9B D2	144	61,2	25	0,35	2015	2014
provino 10B D1						
provino 10B D2						

Tabella 4.4 – Risultati prova ITSM per i provini della serie B

Nella Tabella 4.4 i valori dei moduli misurati e aggiustati per i provini 2B D2, 4B D2, 6B D1 sono stati ricalcolati eliminando l'impulso il cui rise-time era fuori dall'intervallo 124 ± 4 ms.

Di conseguenza è stata calcolata la media dei moduli aggiustati dei due diametri per ogni provino con il relativo SQM (Tabella 4.5).

Provino	Rigidezza aggiustata (MPa)	Media rigidezza (MPa)	SQM
provino 1B D1	4769	4608	228,40
provino 1B D2	4446		
provino 2B D1	2793	2688	149,2
provino 2B D2	2582		
provino 3B D1	4444	4197	349,31
provino 3B D2	3950		
provino 4B D1	4411	4355	79,90
provino 4B D2	4298		
provino 5B D1	3188	3118	98,99
provino 5B D2	3048		
provino 6B D1	1942	1874	96,87
provino 6B D2	1805		
provino 7B D1			
provino 7B D2			
provino 8B D1	4948	4772	248,90
provino 8B D2	4596		
provino 9B D1	2079	2047	45,96
provino 9B D2	2014		
provino 10B D1			
provino 10B D2			

Tabella 4.5 – Media dei moduli di rigidezza dei due diametri per i provini della serie B

Infine è stata calcolata la media dei moduli di tutti i provini della serie B con il relativo SQM (Tabella 4.6).

provino	media rigidezza	SQM
provino 1B	4608	
provino 2B	2688	
provino 3B	4197	
provino 4B	4355	
provino 5B	3118	
provino 6B	1874	
provino 7B	rotto	
provino 8B	4772	
provino 9B	2047	
provino 10B	rotto	
media provini B	3457	1171,69

Tabella 4.6 – Moduli di rigidezza dei provini della serie B con relativa media e SQM

Di seguito si riporta un istogramma che riassume i risultati della prova ITSM per i provini della serie B, ovvero i moduli di rigidezza di ogni singolo provino con relativo SQM e la media delle rigidezze della serie B con relativo SQM.

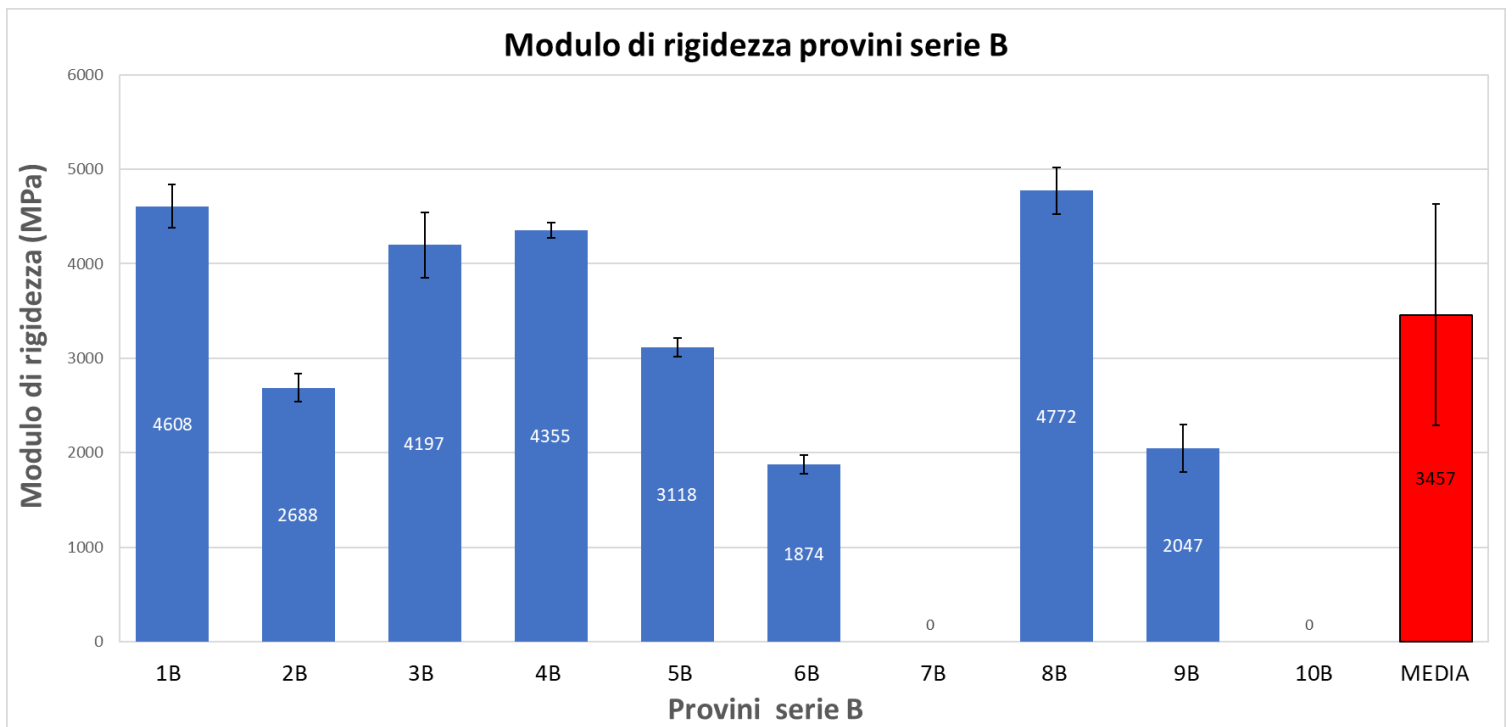


Figura 4.2 – Istogramma dei moduli di rigidezza dei provini della serie B e relativa media

In questo caso i moduli di rigidezza variano tra 1874 MPa (valore minimo) e 4722 MPa (valore massimo) con una media pari 3457 MPa. Lo SQM relativo a tutta la serie è pari a 1172 MPa, a cui corrisponde un coefficiente di variazione pari al 34%.

Confrontando i risultati delle due serie si può notare che la media della serie A (3971 MPa) è più alta rispetto alla media della serie B (3457 MPa). Tuttavia, per le considerazioni fatte nel paragrafo 3.2, questo confronto non è significativo per via della differente composizione granulometrica e del differente contenuto di bitume delle due miscele.

Per quanto riguarda invece l'omogeneità della rigidezza, è possibile osservare che nella serie A si ha una maggiore omogeneità rispetto alla serie B, come dimostrato dal valore del coefficiente di variazione, pari al 16% per la miscela A e al 34% per la miscela B (ovvero quasi il doppio della dispersione). Questa differenza si può notare in modo evidente dal punto di vista grafico anche negli istogrammi riportati nelle Figure 4.1 e 4.2.

Pertanto, contrariamente a quanto ci si poteva attendere, i risultati ottenuti indicano che la miscela preparata con i compound polimerici ha una migliore omogeneità prestazionale in termini di modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM) rispetto alla miscela di riferimento preparata con bitume modificato con polimero SBS.

Va però sottolineato che i valori ITSM ottenuti per la miscela SBS sembrano essere decisamente inferiori (fino a 2-3 volte) rispetto a quelli normalmente riscontrati su miscele analoghe con bitume SBS HARD. Tale osservazione solleva il dubbio che il bitume impiegato per la miscela SBS HARD abbia in realtà una bassa percentuale di modifica (o addirittura nessuna modifica). Questo potrebbe spiegare anche la maggiore dispersione emersa per i provini della serie B, in quanto un bitume non modificato o a basso tenore di modifica è sicuramente meno performante rispetto ad un bitume ad alto tenore di modifica.

4.2 ITFT

Di seguito si riportano i risultati delle prove ITFT delle due serie di provini. Vengono esaminati prima i risultati relativi alla serie A (Tabella 4.7 e Figura 4.3) e poi quelli relativi alla serie B (Tabella 4.8 e Figura 4.4).

Immediatamente prima di procedere alla prova a fatica, per ogni provino è stato misurato nuovamente il modulo di rigidità, indicato nel seguito come modulo “pre-fatica”.

In Tabella 4.7, per ciascun provino, sono riportati il modulo pre-fatica, il numero di cicli di carico a rottura e lo sforzo orizzontale imposto. Inoltre, in tabella è indicata la media di tutta la serie e lo SQM relativo al numero di cicli di carico a rottura.

Provino	Modulo pre-fatica (Mpa)	n°cicli carico	stress orizz. (kPa)	SQM
1A	3014	9086	300	
2A	2682	4886	300	
3A	3674	22886	300	
4A	3736	18496	300	
5A	3024	5636	300	
6A	3736	26297	300	
7A	3408	14546	300	
8A	4399	43546	300	
9A	3711	9876	350	
10A	4232	22306	300	
media provini A	3562	18632		12128,18

Tabella 4.7 – Risultati della prova ITFT per i provini della serie A

Bisogna segnalare che la prova a fatica del provino 9A (il primo in assoluto ad essere testato) è stata effettuata imponendo uno sforzo orizzontale di 350 kPa, mentre tutti gli altri provini sono stati testati considerando uno sforzo di 300 kPa. Per questo motivo il provino 9A non è stato considerato nel calcolare la media della serie.

Il seguente istogramma riassume i risultati della prova ITFT per i provini della serie A. Sull’asse secondario sono riportati i moduli pre-fatica, mentre la barra d’errore relativa alla media rappresenta lo SQM della serie (Figura 4.3).

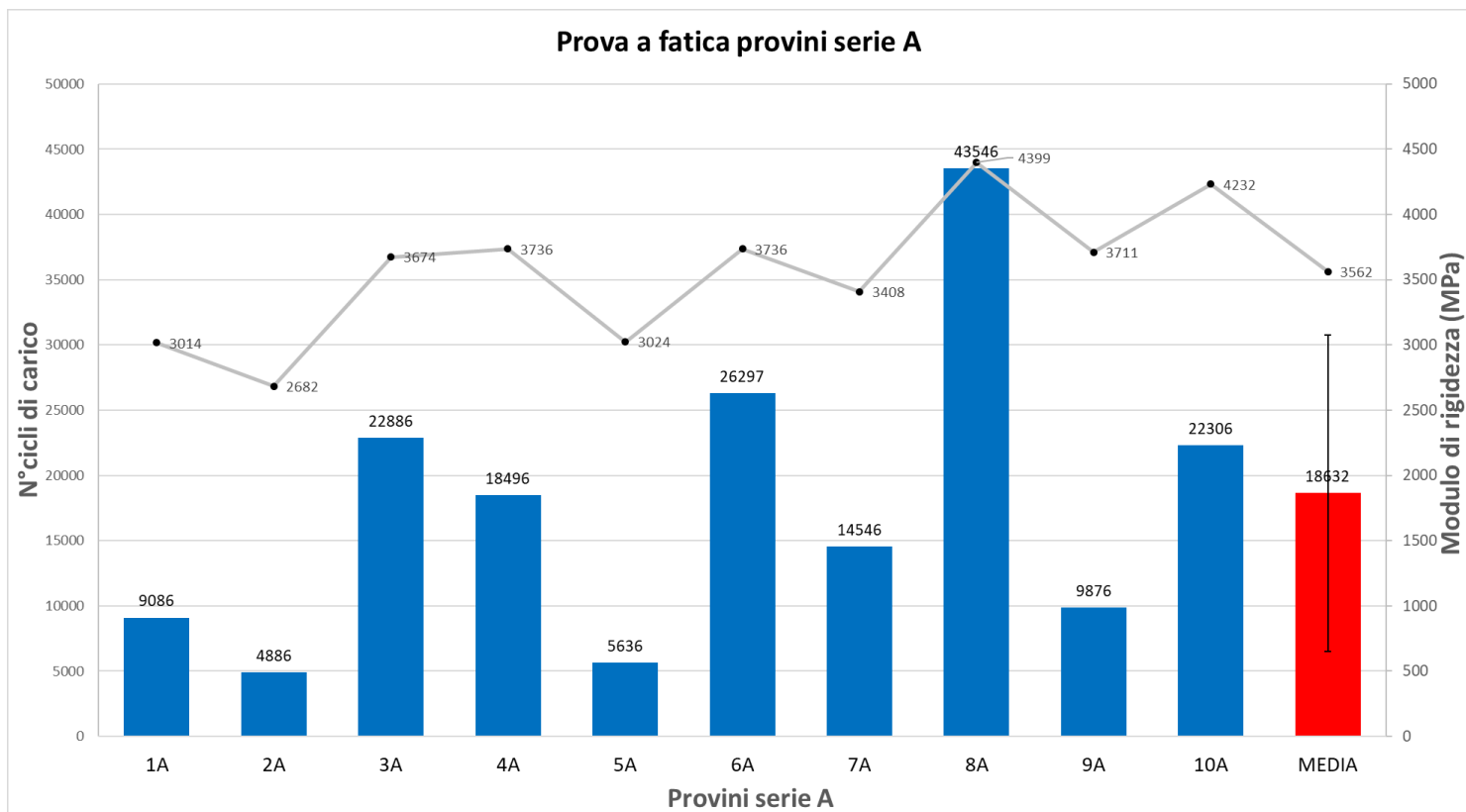


Figura 4.3 – Istogramma del numero dei cicli di carico a rottura per i provini della serie A

I valori del numero di cicli di carico a rottura variano tra 4886 (valore minimo) e 43546 (valore massimo) con una media pari 18632 MPa. Lo SQM è pari a 12128, a cui corrisponde un coefficiente di variazione del 65%.

Provino	Modulo pre-fatica (Mpa)	n°cicli carico	stress orizz. (kPa)	SQM
1B	4088	47876	300	
2B	2273	486	300	
3B	3488	22306	300	
4B	4093	32876	300	
5B	2971	2856	300	
6B	1780	3466	300	
7B	rotto			
8B	4420	50000	300	
9B	1880	2006	300	
10B	rotto			
media provini B	3124	20234		21110,64

Tabella 4.8 – Risultati della prova ITFT per i provini della serie B

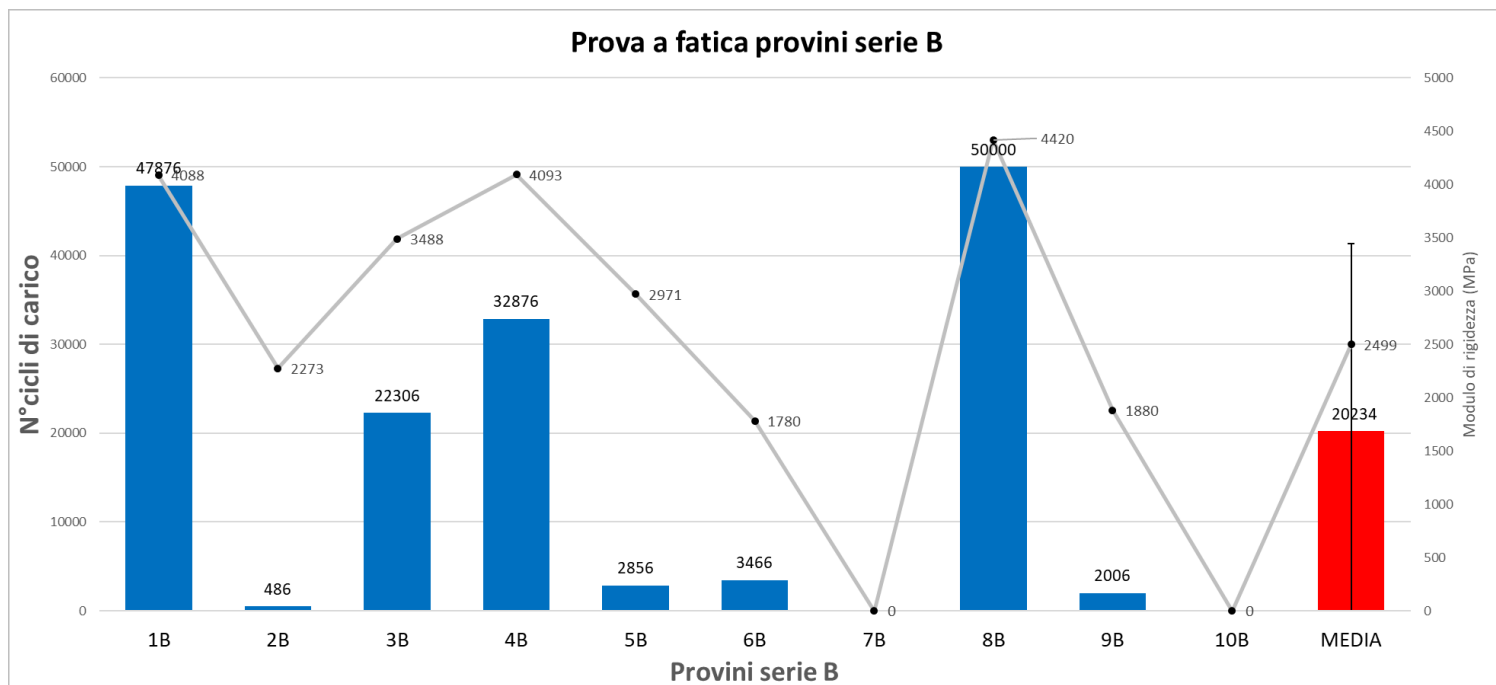


Figura 4.4 – Istogramma del numero dei cicli di carico a rottura per i provini della serie B

Dalla Tabella 4.8 e dalla Figura 4.4 si può osservare che i valori del numero di cicli di carico a rottura variano tra 486 (valore minimo) e 50000 (valore massimo) con una

media pari a 20234. In questo caso lo SQM è pari a 21111, che corrisponde ad un coefficiente di variazione pari al 104%.

In generale, è possibile osservare che i moduli pre-fatica sono tutti tendenzialmente inferiori rispetto a quelli misurati precedentemente. Il motivo di tale differenza non è chiaro al momento e tale aspetto andrà esaminato meglio in futuro.

Per quanto riguarda il confronto tra le due serie in termini di cicli di carico a rottura, si osserva che la serie B ha un valore medio leggermente superiore rispetto alla serie A. Tuttavia, come ribadito in precedenza, tale confronto non è significativo a causa della diversa composizione delle due miscele.

Per quanto riguarda invece l'omogeneità in termini di comportamento a fatica, i provini della serie A sono caratterizzati da una minor dispersione rispetto ai provini della serie B (coefficiente di variazione del 65% per la serie A e del 104% per la serie B).

Ciò è confermato anche dal seguente grafico (Figura 4.5), in cui sull'asse dell'ascisse è riportato il numero di cicli a rottura e sull'asse delle ordinate il modulo di rigidezza. Si può notare come gli indicatori della serie A siano maggiormente raggruppati rispetto a quelli della serie B.

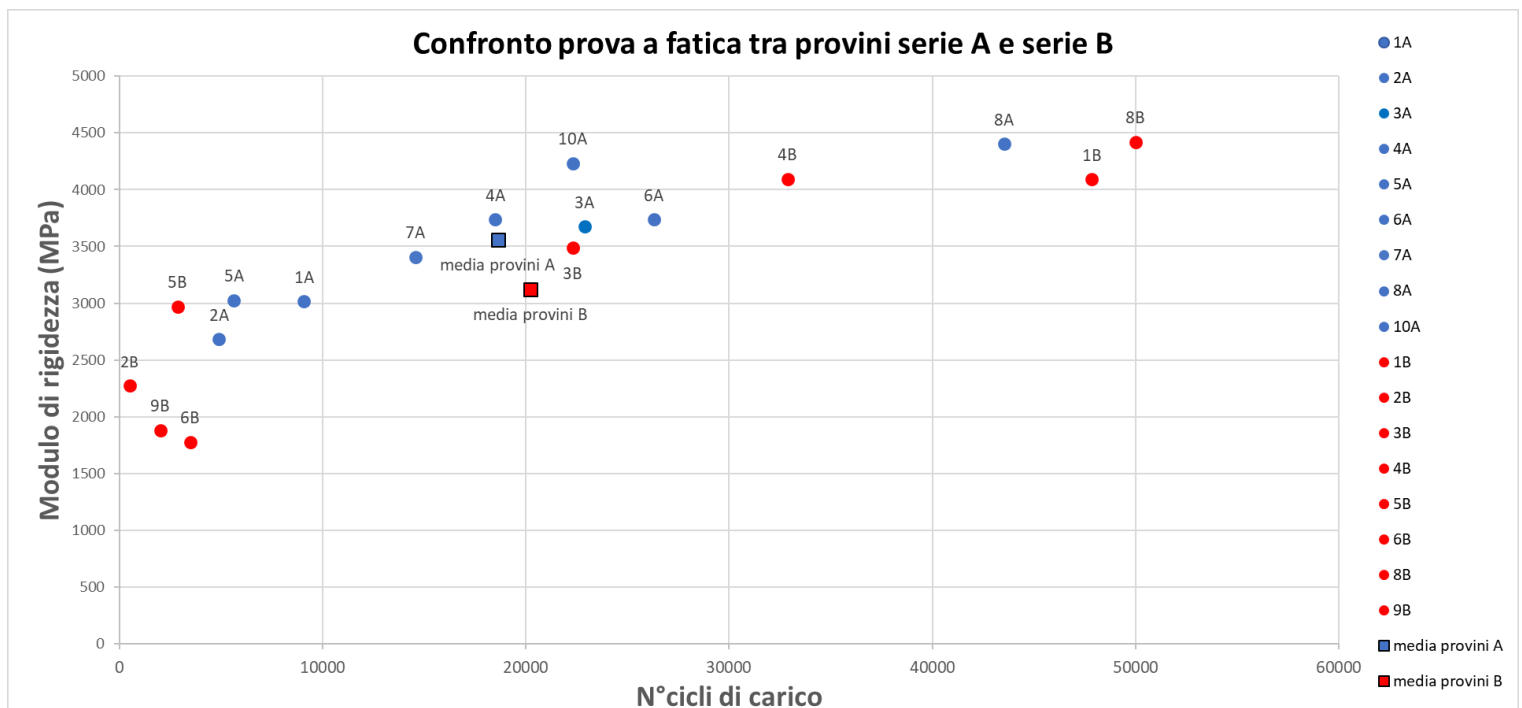


Figura 4.5 – Grafico a dispersione cicli di carico a rottura vs. modulo di rigidezza

In conclusione, si può dunque affermare che i risultati ottenuti indicano che la miscela prodotta con compound polimerici ha un'omogeneità prestazionale migliore in termini di comportamento a fatica rispetto alla miscela preparata con bitume modificato con SBS. Tale risultato è in linea con quanto osservato in termini di ITSM e resistenza a trazione indiretta. Una possibile spiegazione è fornita nella parte finale del paragrafo 4.1.

5 Conclusioni

La sperimentazione oggetto di questa tesi, condotta presso il laboratorio di “Strade e Trasporti” del “Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura” dell’Università Politecnica delle Marche, ha come obiettivo il confronto dell’omogeneità prestazionale tra una miscela bituminosa prodotta con bitume modificato con polimeri SBS e una miscela bituminosa confezionata con compound plastomerici. In particolare, si vuole valutare se il metodo di modifica dry, in cui i compound sono miscelati per pochi secondi con gli aggregati ed il bitume, garantisce un’omogeneità del conglomerato finale comparabile con il metodo di modifica wet, che è attualmente il processo di modifica di riferimento in ambito autostradale.

A tale scopo sono state effettuate in laboratorio prove di modulo a trazione indiretta (ITSM) e prove di resistenza ai carichi ciclici (ITFT) utilizzando l’apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester).

I provini di conglomerato studiati provengono dallo strato di base di un tronco sperimentale in vera grandezza realizzato sulla complanare di accesso dell’Area di servizio Prenestina Est. Le aree di intervento sono 100 x 5 m² per le miscele di tipo SBS HARD e 100 x 5 m² per le miscele con compound polimerico.

L’analisi dei risultati ha permesso di trarre le seguenti conclusioni:

- la miscela confezionata con compound polimerici ha un modulo di rigidità più omogeneo rispetto alla miscela con bitume modificato con SBS, come dimostrato dal fatto che per la prima si è ottenuto un coefficiente di variazione pari al 16%, mentre per la seconda pari al 34%;
- in termini di resistenza ai carichi ciclici, la miscela confezionata con compound polimerici ha un’omogeneità maggiore rispetto alla miscela preparata con bitume modificato con SBS, come evidenziato dai valori del coefficiente di variazione ottenuti, pari al 65% per la miscela con i compound e al 104% per la miscela SBS.

Queste conclusioni non sono ciò che ci si aspettava, poiché la previsione era avere una omogeneità delle prestazioni meccaniche per la miscela con bitume modificato SBS maggiore rispetto alla miscela con compound polimerici, in virtù del fatto che la modifica del bitume nella tecnologia PMB garantisce solitamente una migliore

omogeneità del materiale rispetto alla tecnologia PMA, nella quale i compound polimerici hanno meno probabilità di distribuirsi in maniera uniforme nel bitume.

Tuttavia, è possibile giustificare questi risultati tenendo conto che la granulometria e la percentuale di bitume delle due miscele sono diverse, sebbene il mix design di progetto sia lo stesso, e che i valori ITSM ottenuti per la miscela SBS sembrano essere decisamente inferiori (fino a 2-3 volte) rispetto ai valori tipici, sintomo che il bitume impiegato per la miscela SBS HARD possa avere in realtà una bassa percentuale di modifica (o addirittura nessuna modifica), con conseguente maggiore dispersione dei risultati delle prove di laboratorio.

Bibliografia e sitografia

[1]<<http://www.skiclubsl.it/public/allegato/Catalogo_Pavimentazioni_definitivo_ita.pdf>>

[2]<<<https://iterchimica.it/tipologie/compound-polimerici-per-la-modifica-delle-miscele/>>>

[3]<< https://it.wikipedia.org/wiki/Gomma_SBS>>

[4] *Francesco Mazzotta*, tesi di laurea: “STUDIO REOLOGICO AVANZATO DI BITUMI MODIFICATI ED ADDITIVATI: PROPOSTA DI UNA NUOVA PROCEDURA DI AGING”, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, A.A. 2011-2012; << <https://amslaurea.unibo.it/4257/1/tesi.pdf>>>

[5] <<<https://www.lestradeweb.it/news/prestazioni-incrementate-grazie-alla-chimica-della-strada>>>

[6] <<<https://iterchimica.it/prodotti/superplast/>>>

[7] *Ing. Filippo Montanelli*, “FIBER/POLYMERIC COMPOUND FOR HIGH MODULUS POLYMER MODIFIED ASPHALT (PMA)”;
<<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187704281304487X>>>

[8] <<<https://www.sehnaouiplant.com/iterchimica-superplast-polymers>>>

[9] << <https://www.youtube.com/watch?v=fQM-u9P14j4#action=share>>>

[10] *Eleonora Babbo*, tesi di laurea: “CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DELLA COMPATIBILITA’ DI POLIMERI TERMOPLASTICI NELLE MESCOLE BITUMINOSE”, Università degli studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dei Materiali, A.A. 2010-2011; <<[http://tesi.cab.unipd.it/38009/1/TESI -
_Eleonora_Babbo.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/38009/1/TESI_-_Eleonora_Babbo.pdf)>>

[11] *Francesco Petretto*, tesi di dottorato di ricerca: “LA REOLOGIA DEI LEGANTI BITUMINOSI STRADALI: STUDIO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE A SEGUITO DI PROCESSI DI “AGING” IN LABORATORIO”, Università degli Studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria, 2012; <<[http://amsdottorato.unibo.it/5635/1/Petretto Francesco Tesi.pdf](http://amsdottorato.unibo.it/5635/1/Petretto_Francesco_Tesi.pdf)>>

[12] Norma tecnica UNI EN 12697-1 “Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 1: Contenuto di legante solubile”

[13] Norma tecnica UNI EN 12697-8 “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”

[14] Norma tecnica UNI EN 12697-23 “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi”

[15] Norma tecnica UNI EN 12697-26 “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 26: Rigidezza”, Annesso C

[16] Norma tecnica UNI EN 12697-24 “Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 24: Resistenza alla fatica”