

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE - I C E A  
DEPARTMENT OF CIVIL, ENVIRONMENTAL AND ARCHITECTURAL ENGINEERING

Via Marzolo, 9 - I 35131 Padova  
tel +39 049 8275477  
C.F. 80006480281 - P.IVA 00742430283

**CONVENZIONE DI RICERCA:**  
**“ANALISI DELLE PRESTAZIONI A FATICA DI SISTEMI  
BITUMINOSI BISTRATO RINFORZATI CON  
MATERIALI COMPOSITI A BASE BITUMINOSA”**

COMMITTENTE: INDEX S.P.A.

**RAPPORTO FINALE**

Responsabile Scientifico:

**Prof. Ing. Emiliano Pasquini**  
*Professore Associato – Strade, Ferrovie e Aeroporti*



Padova, gennaio 2022

## Sommario

Premessa ed obiettivi.....	3
1. Sperimentazione.....	5
1.1 Materiali.....	5
1.2 Confezionamento dei provini.....	8
1.3 Prova dinamica di flessione.....	15
1.4 Programma sperimentale.....	25
2. Analisi dei risultati.....	27
2.1 Rigidezza dei sistemi bistrato rinforzati.....	27
2.2 Resistenza ai carichi dinamici.....	28
3. Possibili risvolti applicativi.....	34
3.1 Il dimensionamento delle pavimentazioni stradali bituminose.....	34
3.2 Caso di studio applicativo.....	36
3.2.1 Premesse procedurali.....	36
3.2.2 Dettaglio di calcolo.....	37
Conclusioni.....	49

## Premessa ed obiettivi

Il presente rapporto finale è redatto a conclusione delle attività previste nell'ambito della convenzione riguardante l'“analisi delle prestazioni a fatica di sistemi bituminosi bistrato rinforzati con materiali compositi a base bituminosa” stipulata fra Index S.p.A. ed il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università di Padova. Il responsabile scientifico della ricerca è il Prof. Emiliano Pasquini, Professore Associato di Strade, Ferrovie ed Aeroporti presso il Dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

In particolare, il documento illustra in maniera compiuta obiettivi, metodologie e relativi risultati sperimentali conseguiti durante il progetto di ricerca svoltosi nel Laboratorio di Strade del Dipartimento ICEA. Nello stesso documento, inoltre, si sono voluti anche evidenziare i risvolti di natura pratica relativi al dimensionamento delle pavimentazioni stradali rinforzate che risulterebbero direttamente influenzati dai risultati ottenuti a valle della ricerca proponendo, in tal senso, un caso di studio esemplificativo.

Nello specifico, le attività previste in convenzione sono state volte a verificare il contributo offerto da sistemi di rinforzo compositi ottenuti dall'accoppiamento di membrane bituminose e geosintetici di diversa natura in termini di incremento delle prestazioni a fatica degli strati bituminosi di pavimentazioni stradali flessibili e/o semirigide. A tale proposito, la sperimentazione è stata progettata per consentire la determinazione delle curve di fatica di sistemi bituminosi bistrato rinforzati con i materiali oggetto di studio. Come attività secondaria, comunque indirizzata al conseguimento di informazioni fondamentali per il dimensionamento delle pavimentazioni rinforzati con i materiali in oggetto, la ricerca ha previsto anche la valutazione delle caratteristiche di rigidità in configurazione flessionale dei sistemi bistrato rinforzati.

I suddetti aspetti sono stati indagati attraverso prova dinamiche eseguite secondo protocolli avanzati, conformi alla vigente normativa europea inerente la caratterizzazione prestazionale di conglomerati bituminosi.

La motivazione alla base dello studio risiede nella quantificazione delle accresciute capacità di resistenza a fatica dei sistemi bituminosi bistrato rinforzati con tali tipologie di prodotti rinforzanti. Si fa presente, infatti, che un sistema di rinforzo composito costituito da una membrana bituminosa all'interno della quale viene annegato un rinforzo “propriamente detto” (griglia) viene progettato per coniugare i benefici derivanti dai suddetti prodotti con l'intento di fornire un efficace e tangibile contributo all'estensione della vita utile di pavimentazioni esistenti e/o di nuova costruzione. In particolare, la membrana fungerebbe in tale contesto da SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), cioè da interstrato di rilassamento delle tensioni, mentre la griglia apporterebbe un contributo “strutturale” principalmente volto a ritardare e/o inibire fenomeni fessurativi di riflessione o riconducibili a sollecitazioni di fatica. Come ulteriori vantaggi, la membrana consente di impermeabilizzare la pavimentazione e rende superfluo l'utilizzo di mano d'attacco, con evidenti benefici tecnici ed economici. Tuttavia, occorre anche tenere in debita considerazione una probabile riduzione del livello di adesione fra gli strati di conglomerato bituminoso fra i quali viene interposto il rinforzo con conseguente rischio di scollegamenti (*de-bonding*) in caso di sforzi tangenziali non trascurabili all'interfaccia.

Nel dettaglio, il presente rapporto di ricerca è stato organizzato in differenti capitoli i cui contenuti posso essere riassunti come di seguito:

- nel capitolo 1 viene presentata in maniera sintetica, ma completa ed esaustiva, la sperimentazione effettuata nel Laboratorio di Strade del Dipartimento ICEA, illustrando i materiali oggetto di indagine, le procedure di preparazione e nomenclatura dei campioni, le apparecchiature e le metodologie di prova con le relative tecniche di analisi dei dati ed il programma completo delle prove effettuate;
- nel successivo capitolo 2 è riportata l'analisi dei risultati in termini di rigidità e di resistenza all'applicazione dei carichi dinamici ottenuti per i sistemi bituminosi rinforzati. Il programma sperimentale eseguito ha consentito di trarre importanti considerazioni tecnico-applicative circa il rinforzo investigato, evidenziando in maniera chiara i contributi rinforzanti anche sulla base dei risultati mostrati da un analogo sistema non rinforzato di riferimento;
- nel capitolo 3, poi, si è tentato di implementare in maniera applicativa i risultati osservati a seguito delle prove flessionali dinamiche proponendo un caso di studio ipotetico nel quale si sono adottate delle scelte progettuali congrue con quanto osservato in laboratorio. A tale proposito, una breve introduzione alle modalità di dimensionamento delle pavimentazioni stradali è stata altresì predisposta;
- nel capitolo 4, infine, vengono riassunti i tratti salienti della sperimentazione in oggetto riportando, in particolare, le principali conclusioni alle quali è stato possibile giungere.

Una possibile estensione dello studio in oggetto con indagini di laboratorio potrà essere concordata con specifici accordi successivi e potrebbe riguardare sia l'adozione dei medesimi protocolli con analoghe finalità ad altri materiali di rinforzo sviluppati da Index S.p.A. che l'approfondimento delle prestazioni del rinforzo in oggetto mediante prove differenti o eseguite in condizioni (temperatura, frequenza, ecc.) differenti. Tali possibili estensioni consentirebbero di ottenere un quadro maggiormente esaustivo delle potenzialità del prodotto testato anche ai fini delle relative applicazioni progettuali.

## 1. Sperimentazione

Come già specificato, la ricerca in oggetto è stata orientata alla validazione sperimentale dell'efficacia del rinforzo di strati bituminosi di pavimentazioni flessibili mediante l'impiego di uno specifico materiale composito ottenuto rinforzando una membrana bituminosa ad elevate prestazioni con una griglia in fibra di vetro.

Tale validazione sperimentale si è basata su specifici protocolli di prova innovativi che hanno consentito di stimare in laboratorio il contributo offerto dal materiale di rinforzo nei riguardi della resistenza alle sollecitazioni cicliche (dinamiche) tipiche del traffico veicolare.

Il presente capitolo presenta in maniera esaustiva i materiali utilizzati per la sperimentazione, le tecniche di preparazione di campioni, le metodologie di prova ed il programma sperimentale eseguito per il conseguimento dei suddetti obiettivi.

### 1.1 Materiali

Per la sperimentazione in oggetto sono stati utilizzati campioni prismatici bistrato di conglomerato bituminoso ottenuti mediante taglio di lastre realizzate in laboratorio con compattatore a rullo. Per la preparazione di tali lastre si sono utilizzate due tipologie di conglomerato bituminoso, entrambe prelevate direttamente all'impianto di produzione.

In particolare, per la realizzazione dello strato inferiore delle lastre bistrato è stata impiegata una miscela bituminosa di tipo chiuso tipicamente utilizzata per strati di binder e confezionata con bitume tradizionale. Tale miscela può essere classificata come AC16 in accordo con la recente normativa europea EN 13108-1. Nel dettaglio, essa risulta costituita da aggregati lapidei calcarei di frantumazione e da materiale fresato in quantitativo pari al 20% in peso dell'intera miscela di aggregati, legati con un bitume tradizionale avente classe di penetrazione 50/70 e dosato al 4.4% in peso rispetto alla miscela (il contenuto effettivo finale di bitume risulta pari a 5.4% in peso rispetto agli aggregati tenendo conto del legante apportato dal fresato). Uno studio preliminare condotto mediante pressa a taglio girevole (norma EN 12697-31) ha evidenziato che tale miscela risulta caratterizzata da un contenuto di vuoti di riferimento, ottenuti dopo 100 giri della pressa girevole, pari al 7.4%.

Di contro, per lo strato superiore si è impiegato un conglomerato bituminoso di tipo chiuso anch'esso confezionato con bitume tradizionale ma caratterizzato da granulometria più fine e specificatamente utilizzato per strati di usura. In particolare, la miscela, classificabile come AC10 in accordo con la EN 13108-1, è stata realizzata con aggregati calcarei di primo impiego e materiale fresato in quantitativo pari al 10% in peso dell'intera miscela di aggregati, miscelati con il medesimo bitume tradizionale 50/70 utilizzato per la preparazione del conglomerato bituminoso per lo strato inferiore ma dosato, in questo caso, al 5.0% in peso rispetto agli aggregati (per un contenuto effettivo totale di bitume pari a 5.7% in peso rispetto agli aggregati tenendo conto del legante apportato dal fresato). Dopo specifico studio preliminare condotto mediante pressa a taglio girevole (EN 12697-31), la miscela AC10 è stata compattata in modo tale da ottenere un contenuto di vuoti finale pari al 7.5%.

In tal senso, la Tabella 1.1 riporta la composizione granulometrica delle miscele di aggregati che vengono ulteriormente descritte in Figura 1.1.

Setaccio (mm)	AC 16	AC 10
	% passante	% passante
20	100.0	100.0
16	96.5	100.0
10	77.0	90.8
6.3	54.6	63.7
2	26.6	30.6
0.5	13.4	13.9
0.125	6.9	7.4
0.063	5.1	5.3

Tabella 1.1. Composizione granulometrica dei conglomerati bituminosi

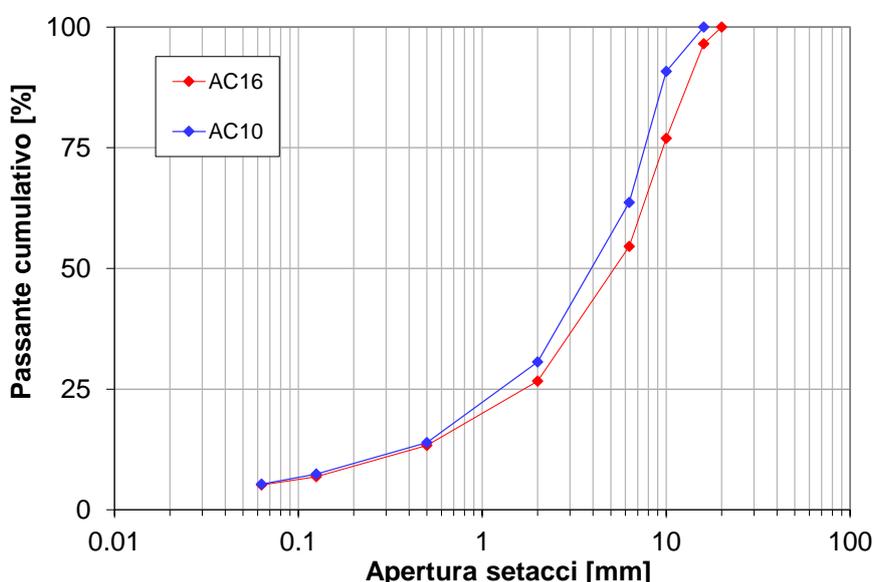


Figura 1.1. Distribuzione granulometrica dei conglomerati bituminosi

A fini comparativi, oltre ai sistemi bistrato rinforzati con il geocomposito oggetto di studio, sono stati analizzati anche analoghi sistemi bistrato non rinforzati utilizzati come sistema di riferimento ai fini della valutazione accurata del contributo apportato dal rinforzo. Per la realizzazione di tali sistemi non rinforzati, simulando le reali operazioni di costruzione in sito, è stata realizzata una mano di attacco fra gli strati inferiore e superiore delle lastre utilizzando una tipica emulsione bituminosa cationica. Le caratteristiche principali dell'emulsione bituminosa utilizzata e del relativo bitume residuo sono riportate in Tabella 1.2. Specificatamente, l'emulsione bituminosa impiegata, codificata come C 55 B 3 in accordo alla normativa europea EN 13808, contiene un legante tradizionale in quantità nominale pari al 55% e con caratteristiche di penetrazione e rammollimento riportate in Tabella, in accordo con le specifiche tecniche fornite dal produttore stesso dell'emulsione.

Proprietà	Normativa	Unità	Valore
Contenuto di legante residuo	EN 1428	%	53÷57
Indice di rottura	EN 13075-1		70÷155
Penetrazione (25 °C)	EN 1426	dmm	≤ 220
Punto di rammollimento	EN 1427	°C	≥ 35

Tabella 1.2. Proprietà di base dei leganti bituminosi

In particolare, la mano di attacco realizzata all'interfaccia dei sistemi bituminosi bistrato non rinforzati di riferimento è stata ottenuta dosando l'emulsione bituminosa in modo tale da ottenere un dosaggio di bitume residuo pari a  $0.15 \text{ kg/m}^2$ , in accordo con la normativa britannica BS 594-2 e facendo riferimento al caso di strati di nuova costruzione.

Infine, il materiale di rinforzo (Figura 1.2), commercializzato con il nome AUTOTENE ASFALTICO ANTIPUMPING HE/TVP, consiste in una membrana bituminosa autotermoadesiva costituita da un compound di tipo elastoplastomero, rinforzata con specifica griglia di armatura in fibra di vetro appositamente studiata per conferire elevata resistenza a trazione al prodotto. In particolare, il materiale composito è caratterizzato da una faccia inferiore autotermoadesiva protetta da film siliconato la cui adesione viene attivata dal calore dello strato superiore di conglomerato bituminoso steso a caldo; tale caratteristica rende superflua (se non addirittura dannosa) l'applicazione di mano d'attacco fra piano di posa e rinforzo. La griglia annessa nella membrana possiede una maglia da  $12.5 \times 12.5 \text{ mm}$  ed è realizzata in fibra di vetro mentre la faccia superiore della membrana è ricoperta con un fine strato minerale, tranne una striscia laterale di sovrapposizione protetta da film siliconato. Come riportato in Tabella 1.3, il composito ha spessore complessivo pari a 2.5 mm e comportamento bidirezionale con una resistenza a trazione L/T di 40 kN/m e corrispondente allungamento a rottura L/T del 4%.

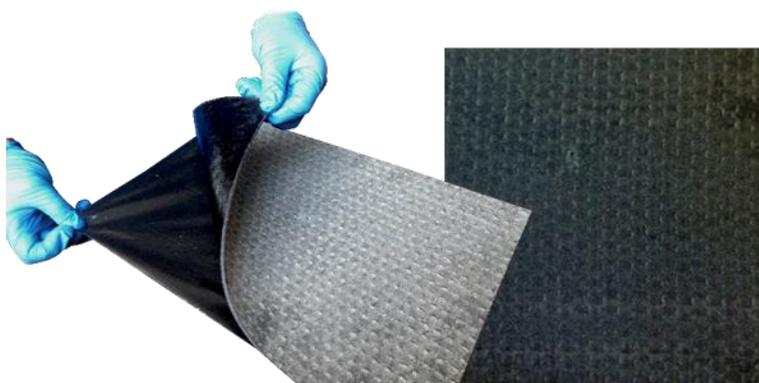


Figura 1.2. Dettaglio del rinforzo studiato

Proprietà	Normativa	Unità	Valore
Spessore	EN 1849-1	mm	2.5
Resistenza a trazione L/T	EN 12311-1	kN/m	40
Allungamento a rottura L/T	EN 12311-1	%	4.0

Tabella 1.3. Caratteristiche tecniche del sistema di rinforzo

## 1.2 Confezionamento dei provini

Come anticipato, i campioni prismatici soggetti alle prove dinamiche flessionali sono stati ottenuti da lastre bistrato preparate in laboratorio tramite specifica apparecchiatura denominata Roller Compactor (compattatore a rullo). Per lo studio in oggetto, sono state realizzate due differenti tipologie di campioni: una rinforzata tramite l'applicazione all'interfaccia del composito oggetto di studio e l'altra non rinforzata a titolo comparativo.

Nel dettaglio, la procedura di preparazione delle lastre bistrato prevede dapprima il riscaldamento del conglomerato bituminoso AC16 alla temperatura di 150 °C per un tempo di 3 h al fine di consentire alla miscela di raggiungere il grado di lavorabilità adeguato alla successiva realizzazione dello strato inferiore della lastra. Il conglomerato bituminoso caldo viene versato nel cassero rettangolare di dimensioni in pianta pari a 300 × 400 mm<sup>2</sup>, che viene poi inserito nel compacttatore a rullo (Figura 1.3). La fustella viene anch'essa riscaldata alla stessa temperatura del conglomerato bituminoso per evitare un rapido raffreddamento del materiale bituminoso posto a contatto con le pareti del cassero. Le pareti della fustella, inoltre, devono essere rivestite con vasellina e con un foglio di carta di giornale sul fondo al fine di agevolare il distacco del conglomerato bituminoso (raffreddato) dalla fustella durante le successive operazioni di rimozione della lastra (scasseramento).

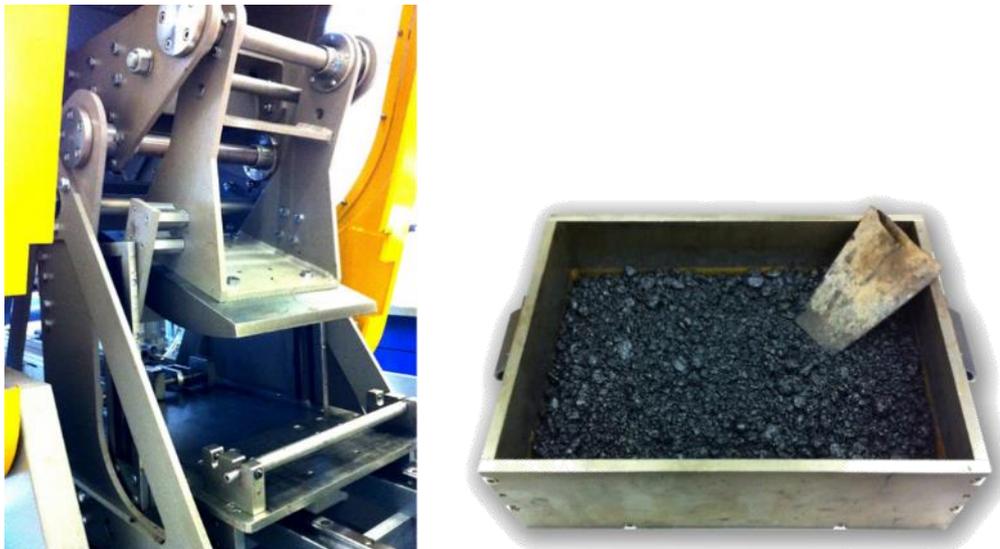


Figura 1.3. Roller compactor (sx) e conglomerato bituminoso all'interno della fustella (dx)

Il compattatore consente di impostare l'altezza finale dello strato tramite un apposito cursore posto sul retro del macchinario in modo tale da poter fissare la densità apparente finale della miscela dosando in maniera opportuna il peso del materiale all'interno della fustella prima di avviare le operazioni di compattazione. A tale proposito, come anticipato, sono stati preliminarmente preparati dei provini attraverso 100 giri di pressa giratoria a taglio ed è stata utilizzata la densità "geometrica" dei campioni così ottenuti per stabilire la densità finale dello strato finito dopo compattazione con il Roller Compactor. Nel caso specifico della miscela AC16, lo strato inferiore è stato compattato fissando uno spessore finale di 30 mm ed una densità "geometrica" (*bulk density*) pari a  $2350 \text{ kg/m}^3$  coincidente con quella dei campioni preparati con la pressa giratoria (indice di vuoti dello strato di circa il 7.4%). Durante tale operazione si è adottata l'accortezza di proteggere il rullo metallico con uno strato di carta plastificata particolarmente resistente al calore in modo tale da evitare residui di materiale bituminoso sul rullo a fine compattazione evitando al contempo di contaminare l'interfaccia con materiale che inficerebbe le prestazioni finali (quali ad esempio olio, vasellina, ecc.).

Successivamente, si è atteso che lo strato di conglomerato bituminoso appena compattato si fosse raffreddato (all'aria) in maniera sufficiente da consentire una corretta preparazione dell'interfaccia (Figura 1.4). Tale operazione di preparazione dell'interfaccia è consistita semplicemente nel disporre al di sopra dello strato finito la membrana bituminosa di rinforzo opportunamente sagomata, garantendo perfetta aderenza con lo strato sottostante e avendo cura di rimuovere la pellicola a protezione della faccia inferiore del prodotto. Per quanto riguarda, invece, l'interfaccia di riferimento, si è proceduto all'accurata applicazione manuale, per mezzo di un pennello, di uno strato di emulsione bituminosa secondo il dosaggio di progetto descritto al paragrafo precedente ( $0.15 \text{ kg/m}^2$  di bitume residuo).

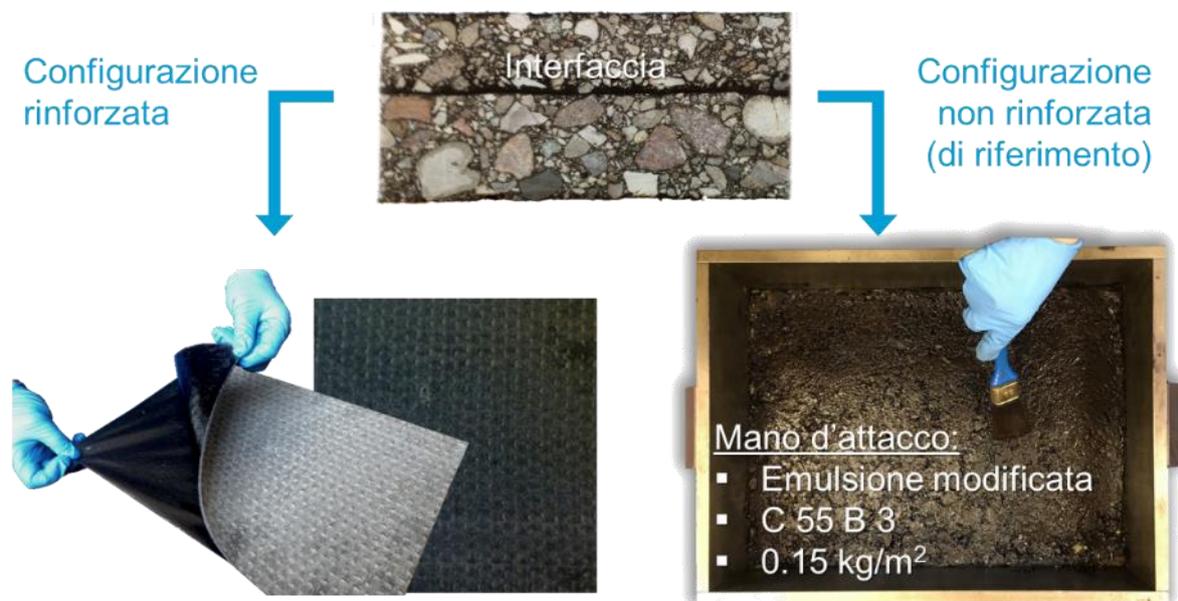


Figura 1.4. Preparazione interfacce di prova

La preparazione delle lastre si è quindi conclusa con la compattazione dello strato superiore dopo aver opportunamente riscaldato la miscela bituminosa corrispondente (conglomerato bituminoso tradizionale AC10) alla temperatura di 150 °C per 3 h (in questo caso la fustella contenente lo strato inferiore non viene riscaldata per via della presenza al suo interno dello strato inferiore precedentemente realizzato). Anche in questo caso si è utilizzata la densità “geometrica” dei campioni preliminarmente preparati con pressa giratoria a taglio con l’obiettivo di ottenere un indice di vuoti dello strato pari a circa il 7.5% (*bulk density* pari a 2340 kg/m<sup>3</sup>). Va precisato che, nel caso dell’interfaccia di riferimento, l’operazione di compattazione dello strato superiore si è potuta effettuare solamente dopo aver atteso il tempo necessario (stimato in almeno un’ora) affinché l’acqua presente all’interno dell’emulsione fosse evaporata completamente, cioè fino a quando il processo di “rottura” dell’emulsione non fosse stato completato.

In definitiva, la procedura appena descritta ha consentito la realizzazione di lastre bistrato dello spessore complessivo di 50 mm (30 mm strato inferiore + 20 mm strato superiore) la cui interfaccia è stata rinforzata con il sistema di rinforzo indagato oppure è stata trattata con mano di attacco di bitume tradizionale a titolo di confronto (Figura 1.5).

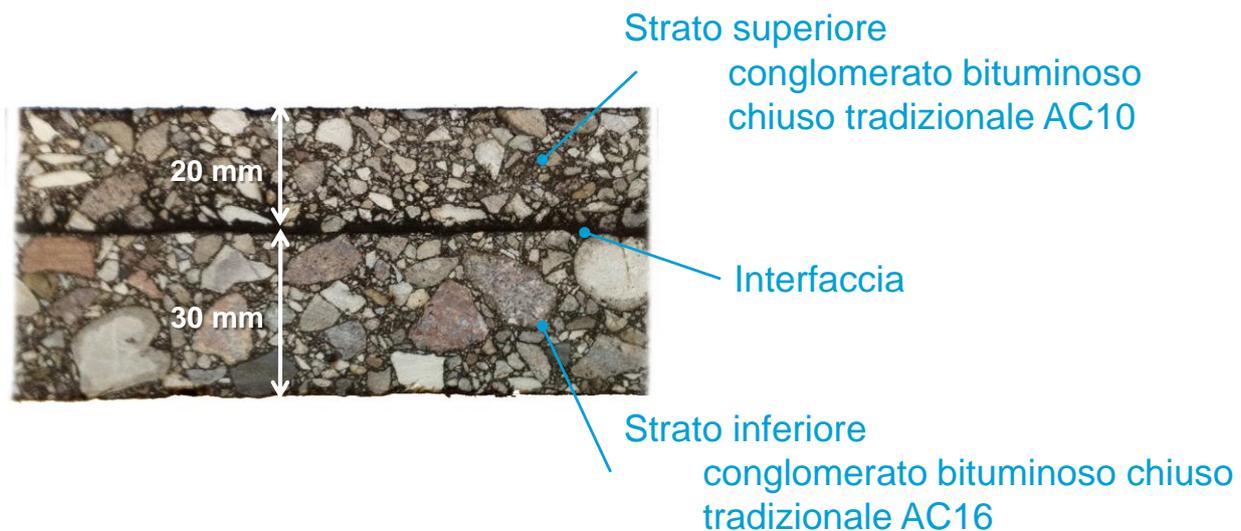


Figura 1.5. Particolare della sezione di lastra bituminosa bistrato

Nello specifico, il compattatore a rullo in dotazione presso il Laboratorio di Strade del Dipartimento ICEA è conforme con la norma EN 12697-33 e consente di compattare lastre di conglomerato bituminoso di specificata densità attraverso il movimento alternato di un segmento di rullo metallico che scarica sul conglomerato bituminoso un predeterminato livello di pressione, simulando la reale compattazione eseguita dai rulli metallici in sito. Il compattatore è azionato in maniera pneumatica (circuito di aria alla pressione di 9 bar) e consente di selezionare diversi livelli di forza fino ad un massimo di circa 30 kN, garantendo uno sforzo distribuito su una superficie pari a 300 × 400 mm<sup>2</sup>. La velocità di compattazione è di 10 cicli/minuto. Lo spessore finito delle lastre compattate può variare da 40 mm a

120 mm. Operativamente, il caricamento della fustella all'interno del compattatore è effettuato dalla porta frontale, equipaggiata con un interruttore di sicurezza.

Le principali caratteristiche del compattatore a rullo utilizzato nella presente sperimentazione sono l'azionamento pneumatico, con il controllo del carico e la movimentazione della tavola orizzontale di compattazione affidati a due attuatori specifici per ognuna delle caratteristiche controllate (movimentazione tavola o controllo del carico). Il carico verticale, inoltre, è misurato con trasduttore di pressione montato sull'attuatore pneumatico mentre la regolazione del carico stesso avviene attraverso una valvola proporzionale. Inoltre, il carico viene regolato con una valvola proporzionale. La posizione del carrello viene controllata da sensori a effetto "Hall" posizionati sia centralmente che alle estremità della corsa di progetto. Il compattatore a rullo è, inoltre, dotato di un'unità di controllo completa di scheda CPU con display grafico mentre la compattazione viene controllata attraverso il carico (feedback del trasduttore di pressione) e attraverso il numero massimo di cicli di compattazione impostato.



1. Porta incernierata con interruttore di sicurezza
2. Unità di controllo con display e tastiera
3. Carrello orizzontale
4. Alloggiamento dei componenti elettro-pneumatici
5. Piede di compattazione

Figura 1.6. Compattatore a rullo utilizzato per il confezionamento dei provini

Operativamente il controllo della macchina avviene mediante una specifica unità dotata di display e tastiera attraverso la quale si impostano i differenti parametri di compattazione.

In particolare, dal menu principale (Figura 1.7) si procede per eseguire la compattazione attraverso il “Menù Prova”, dove si può scegliere tra “Selezione tipo di prova” e “Avvio della prova”. Il menù “Selezione tipo di prova” (Figura 1.8) della macchina consente di scegliere tra due possibilità di compattazione. Nel caso in oggetto, le lastre bistrato sono state preparate utilizzando una compattazione a “Passi di carico” che prevede di impostare i parametri evidenziati in Figura 1.9. In particolare, digitando le dimensioni ed il peso del campione, la densità viene calcolata e mostrata in maniera automatica sulla base di considerazioni puramente geometriche. Si ricorda che i dati inseriti in questa schermata non controllano effettivamente le dimensioni del campione (altezza finale) che in realtà vengono fissate meccanicamente agendo sul cursore posto sul retro del macchinario (Figura 1.10).



Figura 1.7. Menu principale del software del compattatore a rullo

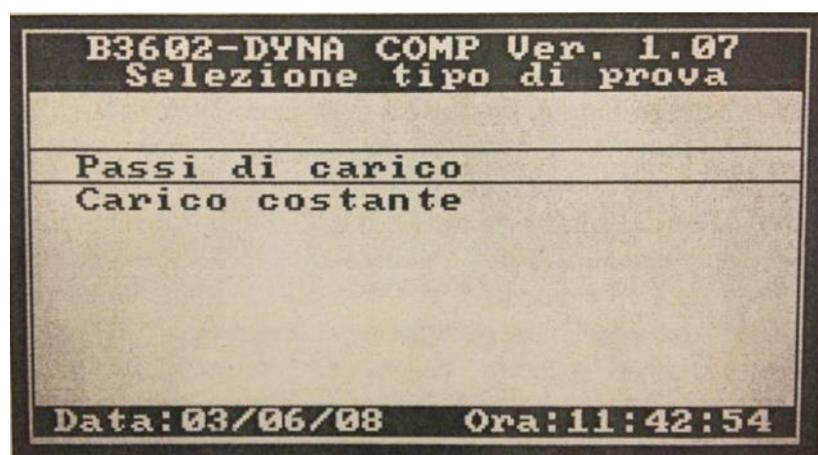


Figura 1.8. Menù per la selezione del tipo di prova



Figura 1.9. Schermata per le impostazioni di prova



Figura 1.10. Corsore per la regolazione dello spessore finale della lastra

Successivamente è possibile avviare la prova secondo i passi di carico preimpostati che, ovviamente, possono essere personalizzati a piacere agendo su un apposito menù del programma. L'”Avvio della prova” avviene tramite la schermata in Figura 1.11 in cui sono riportate le informazioni principali precedentemente impostate e dalla quale è possibile monitorare l'andamento della compattazione in atto (stato della compattazione, carico applicato, numero di cicli residui, tempo trascorso, ecc.).

Nel caso in oggetto si sono utilizzati i parametri di cui alla Tabella 1.4.



Figura 1.11. Schermata per l'avvio ed il monitoraggio della prova

Passi di carico	Forza applicata [kN]	Numero di passate
1	2	4
2	3	4
3	7	4
4	11	4
5	15	4
6	19	5
7	23	7
8	28	7
9	4	5

Tabella 1.4. Passi di carico utilizzati per la compattazione delle lastre

Infine, le lastre bituminose bistrato preparate secondo il procedimento appena descritto sono state lasciate raffreddare a temperatura ambiente sino al giorno successivo per poi procedere alla rimozione della fustella (scasseratura) ed alla successiva estrazione dei campioni di prova. In particolare, le lastre bistrato sono state tagliate mediante sega metallica circolare al fine di ottenere, per ognuna di esse, 4 provini prismatici di larghezza pari a circa 50 mm per le successive prove dinamiche flessionali.

Al fine di una lettura corretta e semplificata dei risultati sperimentali occorre infine specificare che i campioni di prova sono stati codificati utilizzando una sigla del tipo **Xn<sub>i</sub>Y** dove:

- **X** codifica il tipo di interfaccia ed è pari a **U** (interfaccia non rinforzata trattata con emulsione bituminosa) oppure **R** (interfaccia rinforzata con geocomposito);
- **n** rappresenta il numero della lastra di quella particolare configurazione (1, 2, ecc.);
- **Y** indica infine la ripetizione del provino proveniente dalla stessa lastra (A, B, ecc.).

### 1.3 Prova dinamica di flessione

Come anticipato, la verifica della resistenza ai carichi dinamici (simulativi delle azioni impartite dai carichi veicolari) dei campioni prismatici bistrato realizzati secondo le modalità descritte ai paragrafi precedenti è stata effettuata mediante prove di carico cicliche in configurazione di flessione su quattro punti (*Four-Point Bending test 4PB*) conformemente a quanto prescritto dalla normativa europea EN 12697-24. In estrema sintesi, tale prova flessionale prevede in sostanza l'applicazione, attraverso un opportuno sistema di fissaggio, di un carico dinamico di tipo sinusoidale in conseguenza del quale il campione prismatico oscilla periodicamente intorno al proprio asse orizzontale rimanendo fisso in corrispondenza dei due appoggi laterali (Figura 1.12).

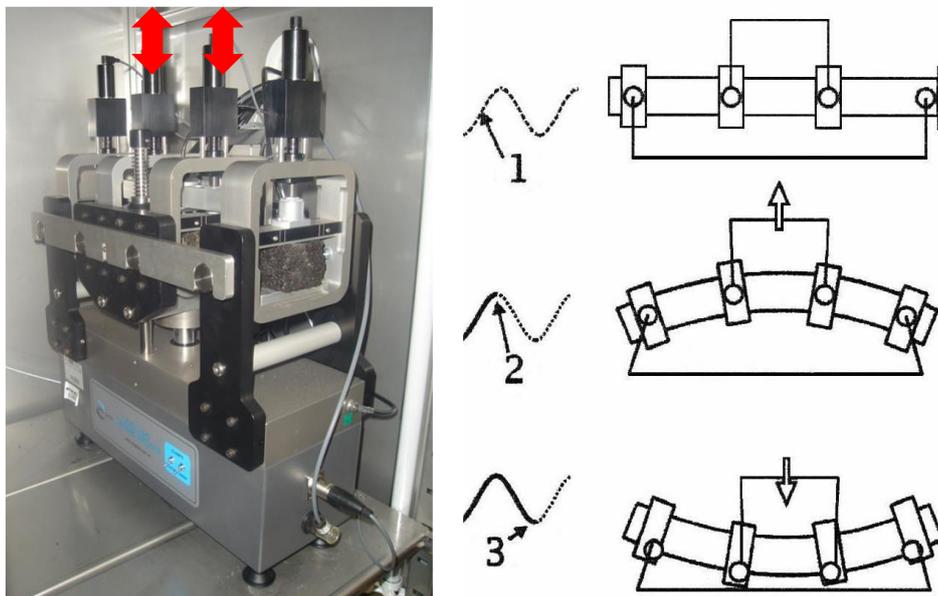


Figura 1.12. Prova dinamica di flessione su 4 punti

Nel dettaglio, per l'esecuzione di tale prova, il provino viene inserito in un telaio progettato in modo tale da riprodurre lo schema statico della trave doppiamente appoggiata e caricata con due forze concentrate, applicate simmetricamente a distanza di  $L/3$ , dove  $L$  è la lunghezza efficace del campione di prova oggetto di studio (escluse le parti esterne rispetto agli appoggi terminali). Di conseguenza, lo schema statico che si genera, rappresentato in Figura 1.13, risulta caratterizzato da una parte centrale del campione soggetta a sforzo di momento puro, cioè in assenza di sforzi di taglio e normali, che rendono particolarmente rappresentativo lo studio.

L'apparecchiatura è essenzialmente composta da una parte meccanica e da un software che funge da interfaccia fra l'utente e la strumentazione, governandone il comportamento. In particolare, è possibile distinguere i seguenti elementi: l'attuatore per l'applicazione ed il controllo della sollecitazione, il telaio di supporto del campione, la camera termostatica per il condizionamento dei campioni ed il controllo della temperatura di prova, la stazione

elettronica per la registrazione dei dati (IMACS) e un computer, collegato alla stazione, nel quale è installato il software di controllo.

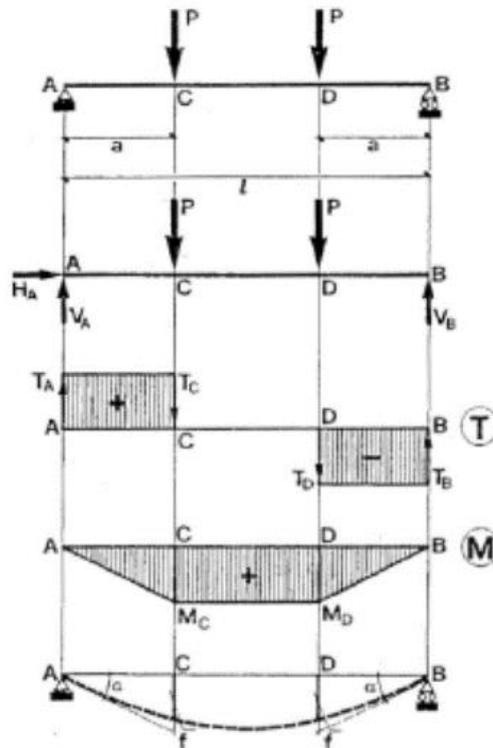


Figura 1.13. Schema statico della prova di flessione su 4 punti

L'attuatore, che viene alimentato da un flusso di aria compressa a sua volta regolato da una servo-valvola controllata elettronicamente, permette l'applicazione di una sollecitazione ciclica di tipo sinusoidale in un ampio range di forze e frequenze, in configurazione di controllo di carico o di deformazione. Tale attuatore risulta collegato meccanicamente al telaio che sostiene il provino attraverso una cella di carico che registra la forza applicata consentendo di controllare l'effettivo andamento della prova in continuo. L'apparecchiatura è inoltre dotata di un trasduttore di spostamento per la misurazione ed il controllo dello spostamento in mezzzeria del provino consentendo quindi di risalire alla conseguente deformazione, note le caratteristiche geometriche del campione ed assumendo valida la teoria tecnica delle travi. I trasduttori di carico e di spostamento trasmettono dei segnali elettrici che, tramite l'IMACS (*Integrated Multi-Axis Control System*), vengono opportunamente convertiti in un output interpretabile a video in termini di tensioni e deformazioni. Come anticipato, l'unità di controllo IMACS è capace sia di leggere i segnali forniti dai trasduttori che di utilizzarli per controllare il sistema confrontandoli con quelli forniti in input e governando l'apertura della servo-valvola che regola il flusso di aria compressa affinché la differenza tra i due valori (teorico e reale) si annulli.

Il telaio di supporto del campione (Figura 1.14) è capace di accogliere il provino prismatico consentendo di riprodurre il suddetto schema statico della trave doppiamente appoggiata e

caricata simmetricamente da due forze. Nello specifico, i quattro punti di appoggio sono costituiti da dispositivi di bloccaggio che mantengono il provino in posizione durante la prova. I morsetti esterni rimangono sempre all'altezza imposta dalla geometria del telaio e giocano il ruolo di doppio appoggio della trave (sono consentite solamente le rotazioni), mentre quelli interni, solidali tra loro, si muovono verticalmente e ciclicamente durante l'applicazione del carico secondo una legge di tipo sinusoidale che intende simulare l'azione flettente riconducibile all'applicazione ripetuta dei carichi veicolari. Gli appoggi esterni inoltre possono traslare orizzontalmente di qualche millimetro simulando il carrello previsto dallo schema statico. La rotazione del provino in corrispondenza di tutti e quattro i morsetti, invece, è libera grazie alla possibilità che questi hanno di ruotare attorno ad un asse orizzontale e trasversale rispetto a quello del provino.

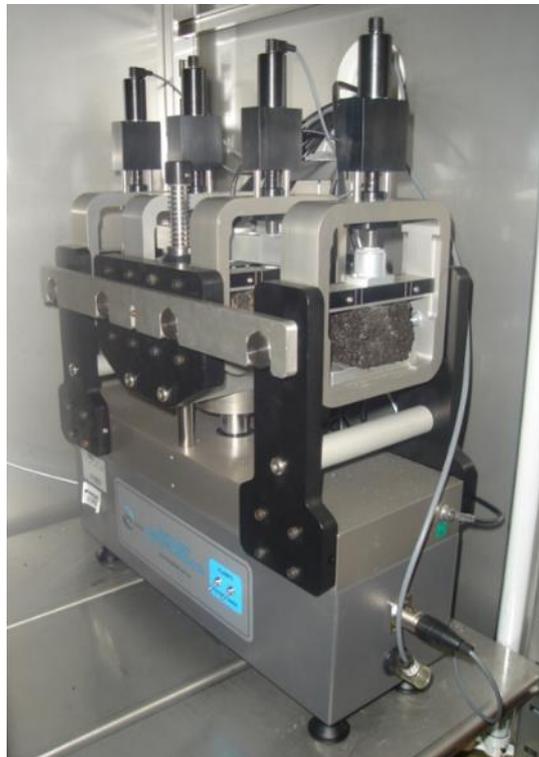


Figura 1.14. Telaio per la prova di flessione su 4 punti

Il bloccaggio del provino avviene tramite delle piastre azionate da quattro motorini elettrici grazie ai quali è possibile ammorsare leggermente i campioni in quattro punti garantendo il corretto mantenimento dello schema statico di progetto durante tutto il corso della prova. Come anticipato, gli spostamenti del provino sono misurati tramite un trasduttore LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) posizionato al centro del telaio, cioè in mezzeria del campione, a contatto con la superficie superiore del provino. Esso, quindi, misura la freccia del campione in relazione allo spostamento che si verifica alla distanza di  $L/6$  dai dispositivi di serraggio interni tramite una piccola barra metallica che aderisce al provino con l'ausilio di due appoggi di gomma caricati da una molla.

Il telaio è collocato all'interno di una camera termostatica ventilata che garantisce il mantenimento della temperatura scelta durante tutto il tempo di prova, nonché il condizionamento del campione prima dell'avvio della prova stessa.

La stazione elettronica per la registrazione dei dati (IMACS) è collegata al dispositivo di applicazione del carico, ai motorini che tengono bloccato il provino in corrispondenza dei morsetti, al trasduttore di spostamento LVDT e, tramite porta USB, al computer dotato di software che gestisce la prova. Come anticipato, tale stazione IMACS ha il compito di mettere in comunicazione la componente software con la componente hardware, della quale controlla anche il funzionamento garantendo la sollecitazione da applicare (tensione o deformazione). Ad essa è affidato inoltre il compito di registrare tutti i dati della prova durante la sua esecuzione, calcolando e restituendo a video in tempo reale tensione, deformazione, modulo di rigidezza, angolo di fase, energia dissipata, ecc.

Il software che gestisce i dati di input e output è chiamato “*Universal Testing System 018*” (UTS018). L'interfaccia principale (Figura 1.15) si presenta costituita da diverse schede dove vanno inserite le informazioni riguardanti i parametri di prova oppure attraverso le quali è possibile visualizzare i risultati ottenuti in continuo. In particolare, la scheda “General” permette di specificare la normativa alla quale si vuole fare riferimento (EN 12697-24 per la resistenza alla fatica o EN 12697-26 per la rigidezza). La prova di fatica consente in ogni caso di eseguire una prova preliminare per la determinazione dei moduli specificandone lo spettro di frequenze (*frequency sweep*). Nella scheda sono presenti, inoltre, delle caselle in cui si inseriscono il nome del progetto, che sarà quello della cartella dove i file dei dati verranno salvati nel computer, ed eventuali commenti dell'operatore.

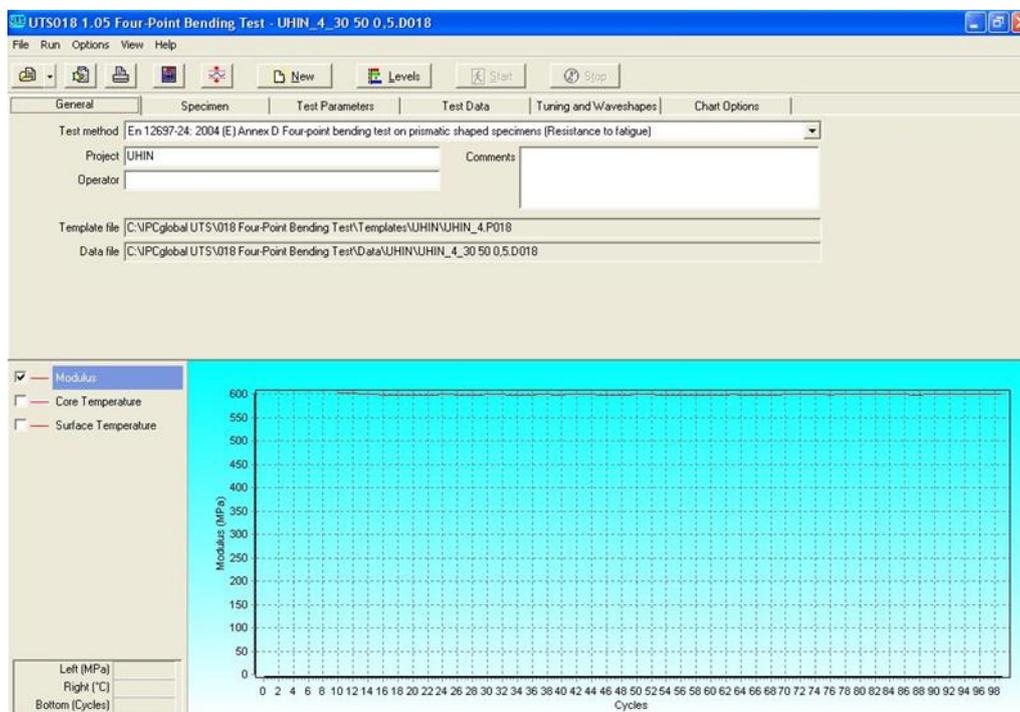


Figura 1.15. Scheda “General” del software UTS018

Nella finestra “Specimen” (Figura 1.16) sono presenti le caselle dove inserire le informazioni riguardanti il provino, quali il codice identificativo, il tempo di condizionamento, le dimensioni (larghezza e spessore in diversi punti) e la massa, dalle quali il programma calcolerà la densità del provino.

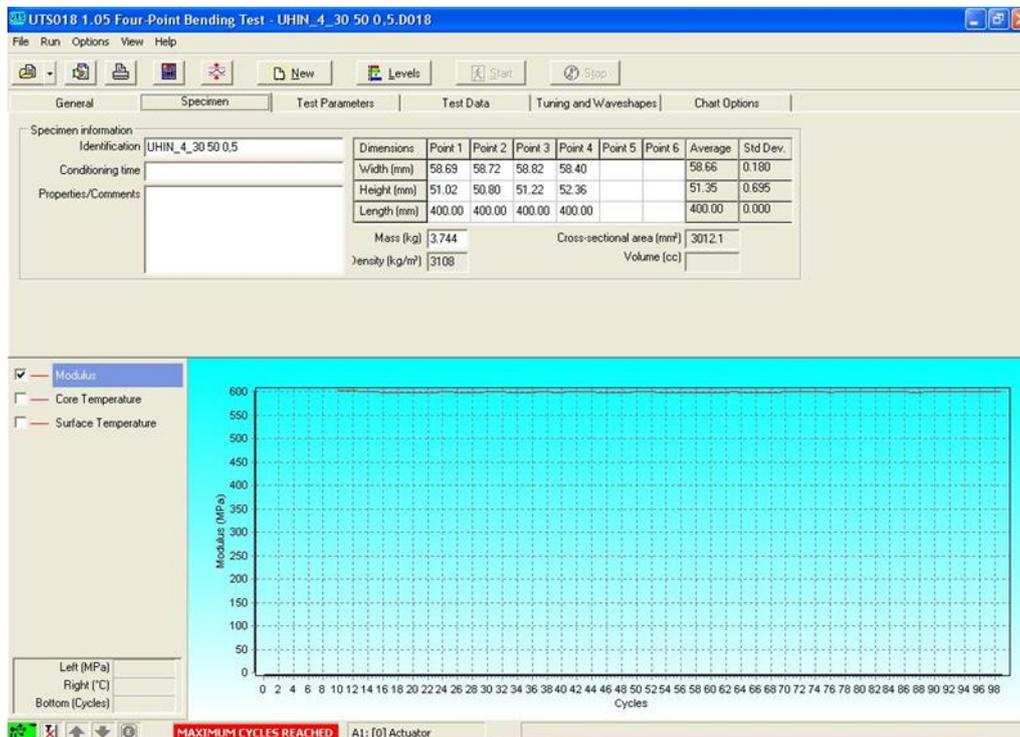


Figura 1.16. Scheda “Specimen” del software UTS018

La finestra “Test Parameters” (Figura 1.17) permette di specificare i parametri di prova quali la modalità di controllo della sollecitazione, il valore della deformazione o della tensione, la frequenza di carico, il numero massimo di cicli a cui sottoporre il provino, ecc. Nella stessa finestra si può impostare la prova preliminare sullo spettro di frequenze (*frequency sweep*), in accordo con la EN 12697-24, indicando le frequenze di interesse e il corrispondente numero di cicli per ognuna di esse.

Nella scheda “Test Data” (Figura 1.18) vengono invece riportati il ciclo corrente, il valore del modulo di rigidezza, i valori reali di stress e deformazione applicati, l’angolo di fase, l’energia dissipata, la forza applicata, lo spostamento misurato dall’LVDT. Nella parte inferiore della pagina sono rappresentati graficamente gli andamenti delle grandezze, che possono essere selezionate nella finestra “Chart Options”, all’avanzare dei cicli. Si possono, per esempio, visualizzare i valori del modulo, della deformazione, della tensione, delle temperature, ecc.

La finestra “Tuning and Waveshapes” è divisa in due parti (Figura 1.19). Nella parte inferiore è riportato lo stesso grafico che si trova nella scheda “Test Data”, mentre in quella superiore è possibile visualizzare in tempo reale i cicli di isteresi, l’andamento del carico e dello spostamento, sia dell’attuatore sia quello misurato sul provino dall’LVDT.

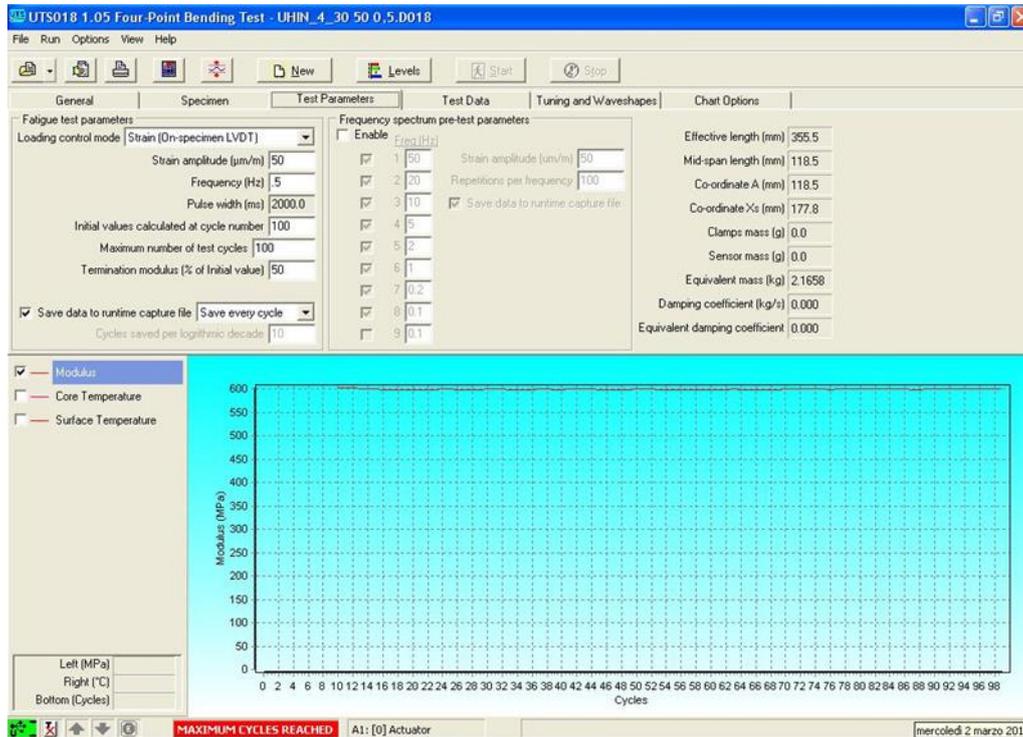


Figura 1.17. Scheda “Test Parameters” del software UTS018

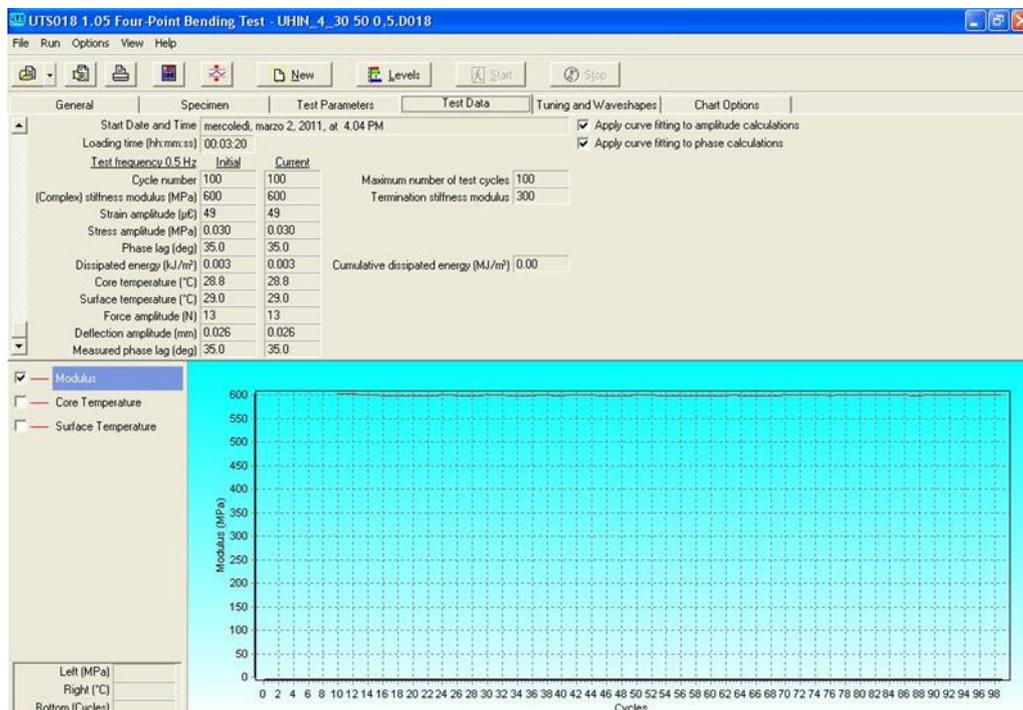


Figura 1.18. Scheda “Test Data” del software UTS018

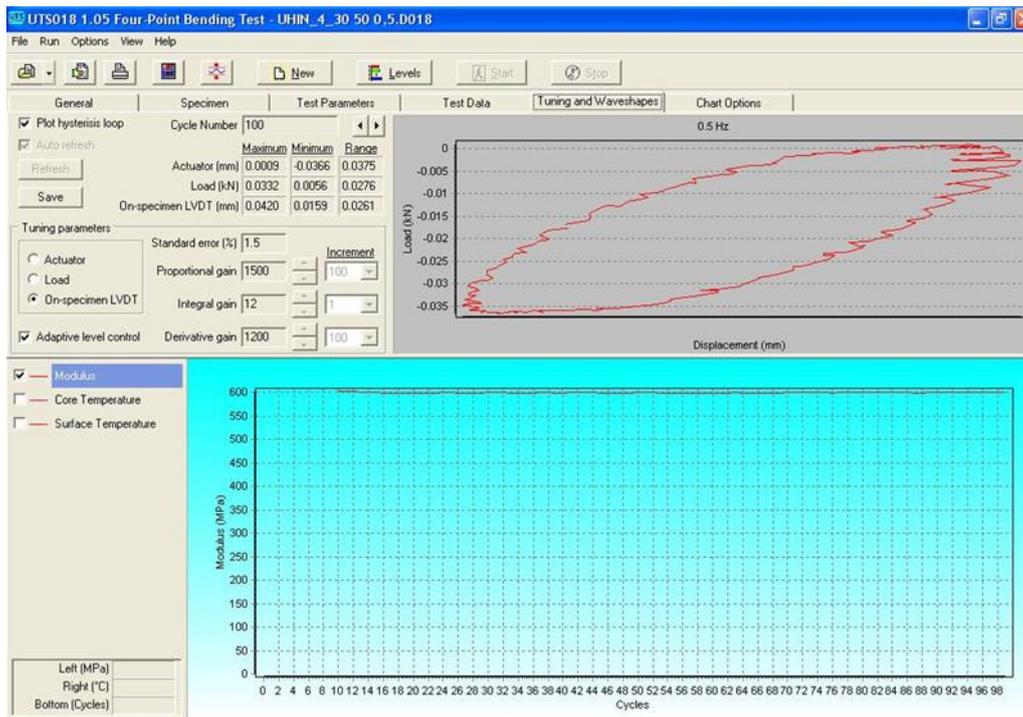


Figura 1.19. Scheda “Tuning and Waveshapes” del software UTS018

Nell’ultima scheda, “Chart Options”, si scelgono quali grandezze visualizzare nei grafici che appaiono nelle altre finestre (Figura 1.20). All’interno dei menu a tendina si attribuiscono all’asse destro e sinistro due dei parametri elencati nella finestra “Test Data” (ad esempio angolo di fase, modulo di rigidità, forza applicata, deformazione ecc.).

Quando si eseguono più prove sullo stesso provino è possibile salvarne il “template” dal menu File. Il “template” è un file che contiene tutte le informazioni inserite prima di una prova, come le dimensioni del provino e i parametri di test impostati, a meno dei dati ottenuti nel suo corso, che invece si salvano nella cartella “Data”. In questo modo non sarà necessario inserire le stesse informazioni ogni volta, ma basterà semplicemente richiamare il file e cambiare solamente i parametri di prova (per esempio la frequenza o il valore della deformazione o della tensione che si vuole raggiungere).

Al di sopra delle schede appena descritte, sono posti alcuni pulsanti che bypassano il menu principale. In particolare, il “Virtual Pendant” permette di muovere verticalmente, in modo manuale, l’attuatore, al quale sono collegati i dispositivi di bloccaggio interni (Figura 1.21). Questa operazione serve per fare in modo che il provino sia perfettamente poggiante su tutti e quattro i dispositivi di bloccaggio. I tasti per i movimenti sono “Axis Jog Control” mentre il tasto “Fast”, se attivato, permette di velocizzare gli spostamenti nel caso si debbano compiere movimenti considerevoli.

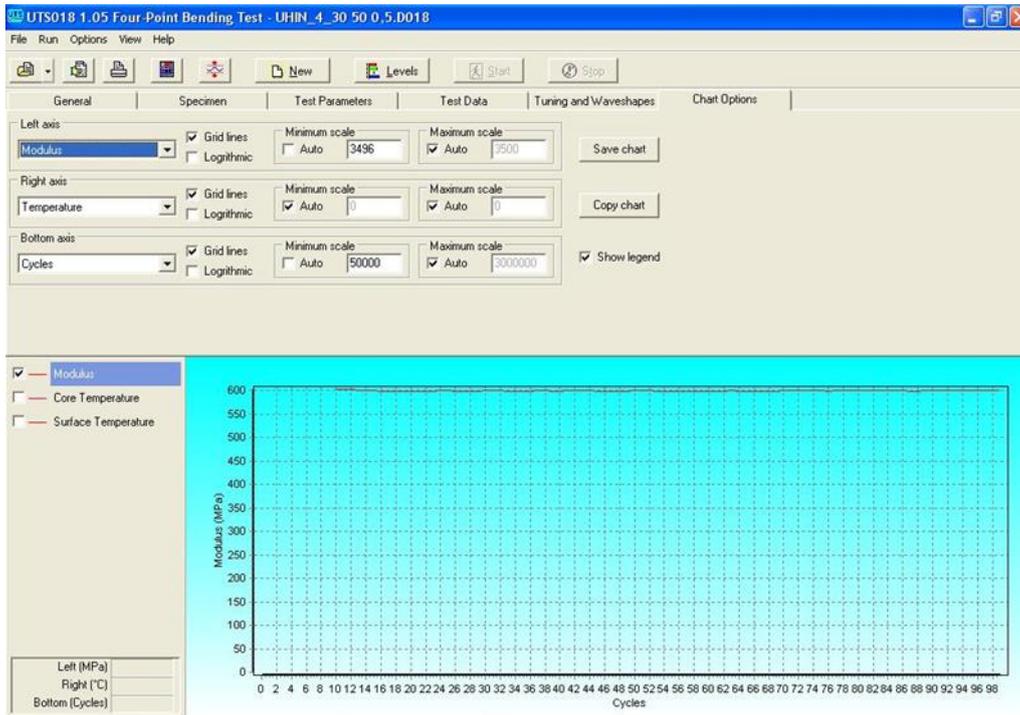


Figura 1.20. Scheda “Chart Options” del software UTS018

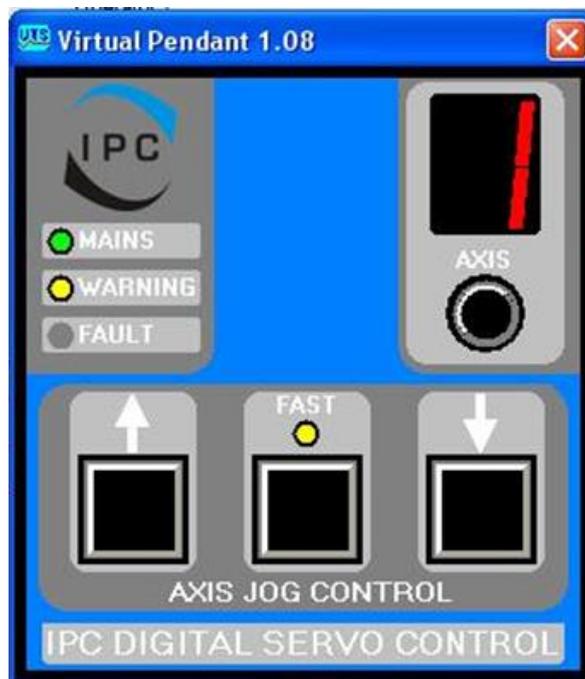


Figura 1.21. Scheda “Virtual Pendant” del software UTS018

Il tasto “Levels”, infine, apre una finestra (Figura 1.22) dove sono indicati i livelli di ogni trasduttore del sistema. La sigla “A1A: Actuator” indica la posizione dell’attuatore e quindi

quella dei due morsetti centrali, “A1B: Load” è il valore del carico registrato dalla cella di carico (all’inizio di ogni prova, con la cella “scarica”, il valore va impostato pari a 0.000 kN), “A1C: On Specimen LVDT” è il valore letto dal trasduttore LVDT posizionato sul provino (all’inizio di ogni prova il valore va impostato a 0.000 mm avvitando o svitando manualmente la vite di supporto del trasduttore), “A2A: Core Temperature” è il valore della temperatura letta dalla sonda posta internamente ad un provino di riferimento all’interno della cella e “A2B: Surface Temperature” è il valore della temperatura letta dalla sonda posta nella cella climatica.

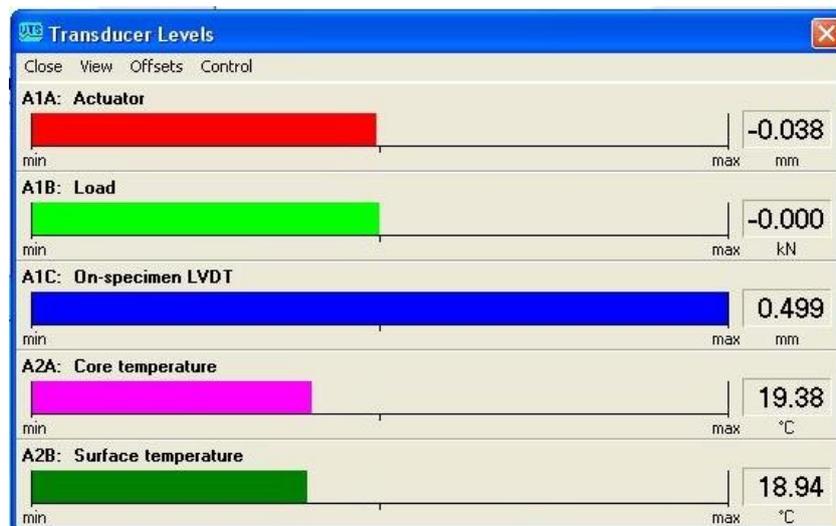


Figura 1.22. Scheda “Transducer Levels” del software UTS018

La procedura di prova prevede innanzitutto di misurare accuratamente le dimensioni del provino da testare (al fine di consentire il corretto calcolo di tensioni e deformazioni) mantenendolo inoltre all’interno della cella termostatica alla temperatura di prova per un tempo sufficiente ad un corretto condizionamento (nel caso in esame i campioni sono stati condizionati per almeno 4 ore). A condizionamento effettuato, si posiziona il campione nel telaio centrandolo rispetto agli appoggi sia in senso longitudinale che in senso trasversale anche per mezzo dell’ausilio di segni verticali di allineamento riportati sulle piastre dei morsetti. In questa fase, una barra spaziatrice opportunamente sagomata viene inserita nei quattro perni di bloccaggio in modo tale da consentirne l’equi distanziamento. Una volta posizionato correttamente il provino, è necessario regolare tramite software l’altezza dell’attuatore agendo sui pulsanti presenti sulla finestra “Virtual Pendant”. Successivamente, dopo aver chiuso i morsetti, si rimuove la barra spaziatrice e si procede nel posizionare opportunamente il trasduttore LVDT sulla superficie del provino. In particolare, con l’ausilio della finestra “Levels” del software si controlla sullo schermo del computer il valore alla voce “A1C: On Specimen LVDT”. Il posizionamento consiste nel ruotare manualmente la vite posizionata al di sopra del trasduttore, tra i due morsetti interni, fino a che non si raggiunge un valore nell’intorno di 0.000 mm. A questo punto il posizionamento del LVDT si considera ottimale e si procede chiudendo la vite di blocco.

Infine, è possibile avviare il test dopo aver inserito i parametri di prova tramite l'interfaccia software installata nel computer utilizzando la scheda "Test Parameters". In particolare, si impostano in questa fase la modalità di prova (controllo di deformazione o di tensione) e la relativa ampiezza dell'onda sinusoidale, la frequenza di sollecitazione, il criterio di rottura, nel caso di prove a fatica, o il numero di cicli a cui si vuole sottoporre il provino, nel caso di prove volte alla determinazione del modulo di rigidezza.

Si ricorda che per le prove in controllo di deformazione (come quelle eseguite nella presente sperimentazione) occorre impostare un valore di deformazione massima in mezzeria, cioè la variazione di lunghezza delle fibre superiori e inferiori del campione rapportata alla lunghezza iniziale ed espressa in *microstrain* ( $\mu\text{m/m}$ ), a cui il provino verrà ciclicamente sottoposto. Di conseguenza, il carico applicato varierà durante la prova regolandosi in base alle deformazioni subite dal provino. In pratica, l'IMACS controlla il valore del carico e della deformazione nel tempo e fa in modo che la forza applicata al provino sia quella necessaria per provocare la deformazione massima desiderata, impostata all'inizio prova, mantenendola costante. In questo caso, a causa dell'indebolimento progressivo del provino, il carico applicato decrescerà durante il corso della prova. Viceversa, la modalità di controllo di tensione consiste nel fissare un valore di carico a cui il provino verrà ciclicamente sottoposto ed al quale corrisponde il valore prefissato di tensione che resta quindi costante per tutta la durata della prova generando deformazioni via via crescenti con il danneggiamento del provino.

Nel caso in oggetto, sono state condotte prove di fatica, in accordo con la normativa europea EN 12697-24, alla temperatura di 20 °C controllando la deformazione dell'onda di tipo sinusoidale applicata la cui ampiezza è stata impostata rispettivamente pari a 200  $\mu\text{strain}$ , 300  $\mu\text{strain}$  e 400  $\mu\text{strain}$ . Tutte le prove flessionali sono state comunque precedute da una fase preliminare di prova durante la quale sono stati misurati i moduli di rigidezza flessionali, conformemente alla normativa europea EN 12697-26, a diverse frequenze di carico, che variavano 0.1 Hz a 30 Hz, ed impostando un'ampiezza della sollecitazione pari a 50  $\mu\text{strain}$ . Tale ampiezza ridotta è stata selezionata in modo tale da evitare danneggiamenti nel campione prima delle successive prove di fatica.

Per quanto riguarda, invece, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati restituiti dalla prova di fatica occorre precisare che, applicando la teoria tecnica delle travi e misurando carico e spostamento in mezzeria, è possibile risalire alla rigidezza del sistema bistrato nel corso della prova, determinando convenzionalmente la rottura del campione per fatica al raggiungimento di una rigidezza pari alla metà della rigidezza misurata ad inizio prova (Figura 1.23). Ripetendo il test con differenti livelli di sollecitazione è stato quindi possibile risalire alla costruzione delle curve di fatica (Figura 1.24) dove  $N$  rappresenta il numero di cicli a rottura per fatica in conseguenza di un'ampiezza della deformazione pari a  $\epsilon$ .

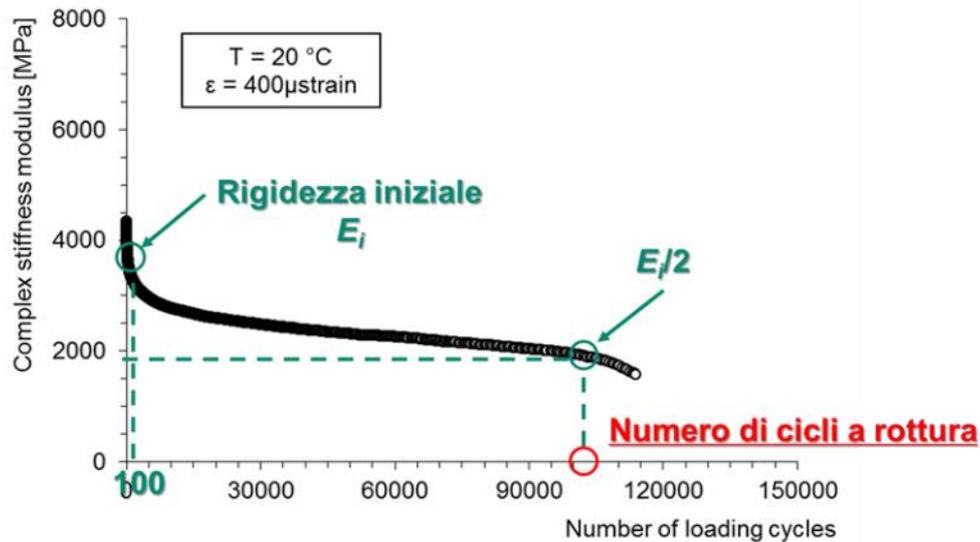


Figura 1.23. Criterio di rottura a fatica prove di flessione su 4 punti

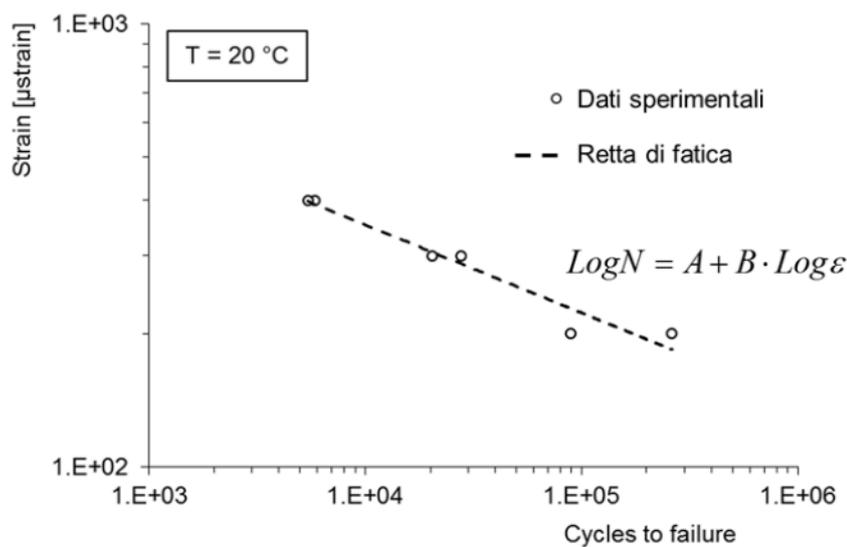


Figura 1.24. Costruzione curve di fatica prove di flessione su 4 punti

### 1.4 Programma sperimentale

Dopo aver illustrato i materiali utilizzati nonché le metodologie di preparazione dei campioni e di svolgimento delle prove con relative tecniche di analisi dei dati, nel presente paragrafo si intende presentare nel dettaglio il programma sperimentale condotto presso il Laboratorio di Strade del Dipartimento ICEA dell'Università degli Studi di Padova attraverso il quale si è proceduto alla caratterizzazione sperimentale avanzata del rinforzo oggetto di studio.

Come anticipato, il programma sperimentale ha previsto lo studio di 2 differenti tipologie di sistemi bistrato ottenute variando la configurazione all'interfaccia (rinforzata **R** o non

rinforzata **U**). Le due tipologie di campioni sono state sottoposte a prove dinamiche con applicazioni di carichi di tipo sinusoidale per la determina della resistenza ai carichi ciclici, in configurazione di flessione su 4 punti. L'obiettivo principale è stato quello di comprendere in che misura i rinforzi analizzati migliorino la resistenza ai carichi dinamici (resistenza a fatica) di sistemi bistrato in conglomerato bituminoso.

In particolare, le prove dinamiche 4PB sono state eseguite in controllo di deformazione alla temperatura di 20 °C ed alla frequenza di 10 Hz sottoponendo i campioni prismatici bistrato a sollecitazioni sinusoidali caratterizzate da tre differenti livelli di sollecitazione (ampiezza della deformazione in mezzeria rispettivamente pari a 200  $\mu$ strain, 300  $\mu$ strain e 400  $\mu$ strain); per ogni configurazione analizzata sono state effettuate 2 ripetizioni. Si ricorda che tutte le prove flessionali di fatica hanno previsto una fase preliminare di determinazione della rigidità alla stessa temperatura di 20 °C mediante applicazione di sollecitazioni sinusoidali a controllo di deformazione a 6 differenti frequenze (0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30 Hz) e tutte caratterizzate da un'ampiezza dell'onda di 50  $\mu$ strain.

In definitiva, quindi, la sperimentazione ha complessivamente previsto la preparazione mediante il Roller Compactor di 4 lastre bituminose bistrato (2 lastre per ognuna delle 2 configurazioni all'interfaccia) dalle quali estrarre 16 campioni prismatici per le prove dinamiche flessionali di rigidità e fatica (Tabella 1.5). Le prove sono state poi eseguite su 12 dei 16 campioni ottenuti; la scelta dei provini da sottoporre a prova è avvenuta mediante campionamento casuale. I restanti provini sono stati stoccati per eventuali ripetizioni aggiuntive in caso si fossero ottenuti dei risultati discordanti (circostanza non verificatasi).

Interface configuration	Four-point bending tests (T= 20°C, f = 10 Hz)		
	Repetitions		
	$\epsilon=200 \mu$ strain	$\epsilon=300 \mu$ strain	$\epsilon=400 \mu$ strain
U	2	2	2
R	2	2	2

Tabella 1.5. Programma sperimentale di laboratorio

## 2. Analisi dei risultati

Il presente capitolo presenta l'analisi dei risultati sperimentali ottenuti in laboratorio a seguito dello studio sperimentale presentato nel precedente capitolo. In particolare, si ricorda che lo studio si è basato sulla riproduzione in laboratorio di un sistema bituminoso bistrato, con applicazione all'interfaccia del prodotto di rinforzo presentato nel presente documento. Un sistema non rinforzato è stato inoltre studiato a titolo comparativo, consentendo di evidenziare il contributo del geocomposito. Le prestazioni sono state analizzate attraverso un protocollo di prova innovativo e conforme alla recente normativa tecnica europea, volto alla determinazione della rigidità e della resistenza a fatica dei sistemi bituminosi bistrato.

### 2.1 Rigidità dei sistemi bistrato rinforzati

Come già specificato, le prove di fatica eseguite in controllo di deformazione, oggetto principale della presente sperimentazione, sono state precedute da test preliminari volti alla determinazione delle caratteristiche di rigidità del sistema bistrato in configurazione di flessione sottoponendo i campioni a *frequency sweeps* in controllo di deformazione alla temperatura di 20 °C applicando 100 onde di carico sinusoidali con ampiezza pari a 50  $\mu$ strain (al fine di evitare danneggiamenti ai campioni) e frequenze selezionate variabili da 0.1 a 30 Hz (specificatamente 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30 Hz). Il presente paragrafo intende quindi sintetizzare i risultati sperimentali ottenuti durante tale fase preliminare.

A tale scopo, la Tabella 2.1 riporta i dati sperimentali conseguiti attraverso l'esecuzione delle 12 prove di flessione dinamica sui campioni bistrato realizzati in laboratorio. I risultati sono espressi in termini di valore assoluto del modulo complesso  $E^*$  in funzione della relativa frequenza di prova. I risultati sperimentali sono inoltre sintetizzati in Figura 2.1 dove è possibile osservare il valore medio delle rigidità dei due sistemi bistrato testati al variare della frequenza di prova. In tale grafico vengono riportate anche le barre di errore che rappresentano il valore massimo ed il valore minimo misurato ad ogni configurazione.

Specimen	$E^*$ [MPa]					
	0.1 Hz	0.3 Hz	1 Hz	3 Hz	10 Hz	30 Hz
U1_D	2212	3309	4838	6572	8770	10734
U2_C	1917	2946	4435	6222	8374	10354
U1_C	2263	3360	4913	6612	8771	10668
U2_E	1659	2563	3827	5251	7066	8425
U1_A	1997	2952	4336	5840	7833	9786
U2_A	1785	2730	4029	5517	7421	9140
R2_A	815	1275	2084	2782	4097	5245
R2_C	933	1463	2286	3349	4784	6161
R2_D	1313	2048	3226	4429	6385	7976
R1_E	1516	2165	3081	4383	5768	7111
R2_E	925	1536	2440	3573	5140	6671
R1_F	1217	1780	2584	3560	4820	6002

Tabella 2.1. Risultati sperimentali prova 4PB: moduli di rigidità

Come è possibile osservare, nel caso dei provini non rinforzati U, le barre di errore non sono visibilmente apprezzabili nella scala di rappresentazione attuale a causa dei valori estremamente ravvicinati misurati su 6 provini testati; viceversa, una maggiore variabilità si evince nel caso dei sistemi rinforzati R. In ogni caso, i dati riportati nella Tabella e nella Figura precedentemente citate in termini di rigidezza flessionale confermano in maniera inequivocabile quanto già emerso nella letteratura di settore in merito al fatto che la presenza di un elemento “estraneo” all’interfaccia fra due strati di conglomerato bituminoso ne influenzi negativamente il loro grado di compartecipazione provocando quindi minori rigidezze del sistema. Nello studio in oggetto tale riduzione di rigidezza non sembra influenzata dalla frequenza di prova e si attesta generalmente intorno al 35-40%.

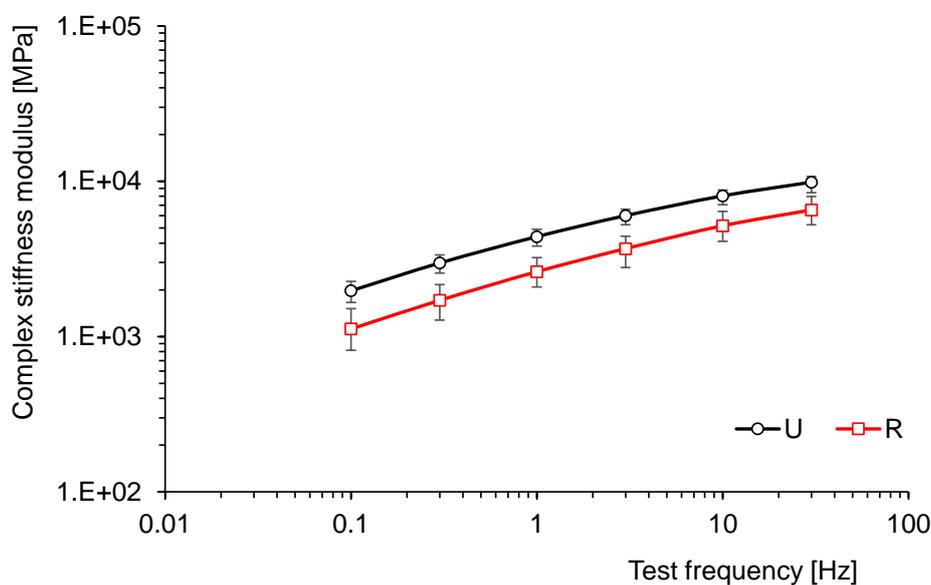


Figura 2.1. Valore assoluto medio modulo di rigidezza flessionale

## 2.2 Resistenza ai carichi dinamici

Nel presente paragrafo si riportano i risultati ottenuti a seguito delle prove dinamiche in configurazione di flessione su 4 punti eseguiti su campioni prismatici alla temperatura di 20 °C ed alla frequenza di 10 Hz sulle due configurazioni di sistemi bistrato riprodotte in laboratorio (rinforzata con geocomposito R e non rinforzata di riferimento U), così come descritto dettagliatamente al capitolo precedente. Le prove sono state eseguite in controllo di deformazione applicando tre differenti livelli di sollecitazione (200, 300 e 400  $\mu$ strain).

Sulla base di tale premessa, la Tabella 2.2 riporta i dati sperimentali conseguiti attraverso l’esecuzione delle 12 prove di flessione dinamica sui campioni bistrato realizzati in laboratorio. I risultati, suddivisi in base al livello di sollecitazione applicato, sono espressi in termini di numero di cicli a rottura  $N_{50}$  in accordo con le procedure di elaborazione dei dati descritte nel precedente capitolo. Per completezza, la Tabella riporta anche i corrispondenti

valori assoluti del modulo complesso  $E^*$  in funzione della relativa frequenza di prova già introdotti ed analizzati nel paragrafo precedente.

Specimen	$E^*$ [MPa]						Number of cycles to failure		
	0.1 Hz	0.3 Hz	1 Hz	3 Hz	10 Hz	30 Hz	200 $\mu\text{m/m}$	300 $\mu\text{m/m}$	400 $\mu\text{m/m}$
U1_D	2212	3309	4838	6572	8770	10734			6167
U2_C	1917	2946	4435	6222	8374	10354			6740
U1_C	2263	3360	4913	6612	8771	10668		17410	
U2_E	1659	2563	3827	5251	7066	8425		31060	
U1_A	1997	2952	4336	5840	7833	9786	159303		
U2_A	1785	2730	4029	5517	7421	9140	208964		
R2_A	815	1275	2084	2782	4097	5245			155944
R2_C	933	1463	2286	3349	4784	6161			125859
R2_D	1313	2048	3226	4429	6385	7976		384214	
R1_E	1516	2165	3081	4383	5768	7111		372324	
R2_E	925	1536	2440	3573	5140	6671	2652713		
R1_F	1217	1780	2584	3560	4820	6002	1981502		

Tabella 2.2. Risultati sperimentali prova 4PB: resistenza ai carichi ciclici

Come si evince con chiarezza dai risultati riportati in Tabella 2.2, la minore rigidità misurata nel caso dei sistemi bistrato rinforzati, seppur debba essere tenuta in opportuna considerazione durante il dimensionamento delle pavimentazioni rinforzate, non risulta affatto correlata con la resistenza a lungo termine del sistema bistrato rinforzato sottoposto ai carichi ciclici veicolari, come dimostrato dalle prove di fatica effettuate in configurazione di flessione su 4 punti, i cui risultati vengono analizzati dettagliatamente nel seguito.

A tal proposito, difatti, le Figure 2.2–2.4 riportano i risultati sperimentali delle singole prove di fatica effettuate in termini di valore assoluto del modulo di rigidità flessionale in funzione del relativo numero di cicli di carico. Si evidenzia in tal senso il comportamento profondamente differente dei sistemi non rinforzati U, caratterizzati da una vita a fatica estremamente ridotta se confrontata con i corrispondenti sistemi rinforzati R sottoposti alle medesime condizioni di prova (temperatura e livello di sollecitazione). Come si evince dalle suddette Figure, è possibile distinguere in maniera piuttosto netta, per tutte le configurazioni di prova analizzate, la resistenza ai carichi ciclici esibita del sistema non rinforzato rispetto a quella della configurazione rinforzata. Difatti, per tutti i livelli deformativi indagati, i provini rinforzati (curve rosse nelle Figure 2.2–2.4), seppur caratterizzati da minore rigidità iniziale, hanno restituito una vita utile a fatica notevolmente superiore rispetto al corrispondente sistema non rinforzato (curve nere nelle Figure 2.2–2.4), dimostrando come il contributo del sistema di rinforzo sia principalmente volto ad inibire la propagazione del danno (fessurazione) all'interno del materiale, piuttosto che ad incrementare la rigidità della pavimentazione stessa. Si fa inoltre notare che le due ripetizioni effettuate per ogni configurazione hanno mostrato andamenti tendenzialmente paragonabili fra loro.

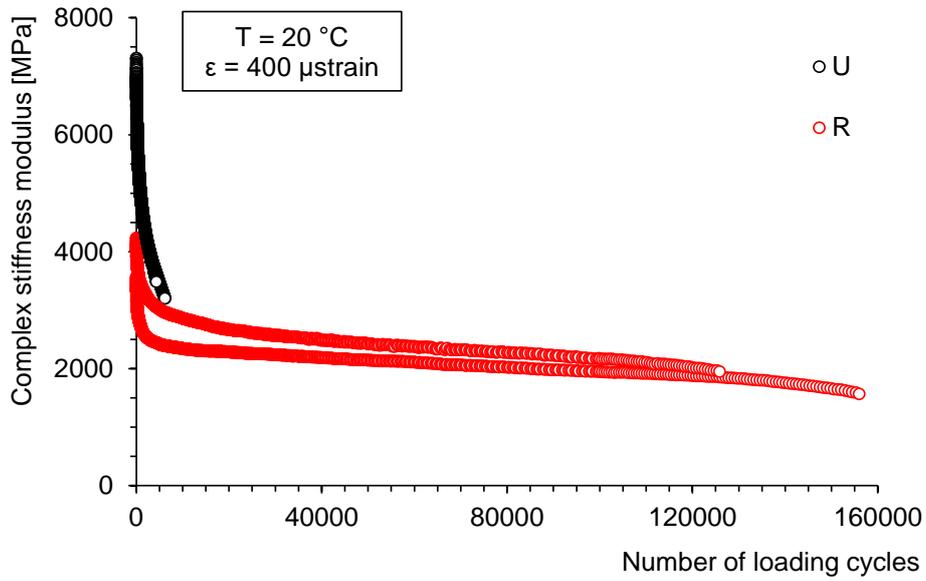


Figura 2.2. Risultati sperimentali prove di fatica flessionale ( $\epsilon = 400 \mu\text{strain}$ )

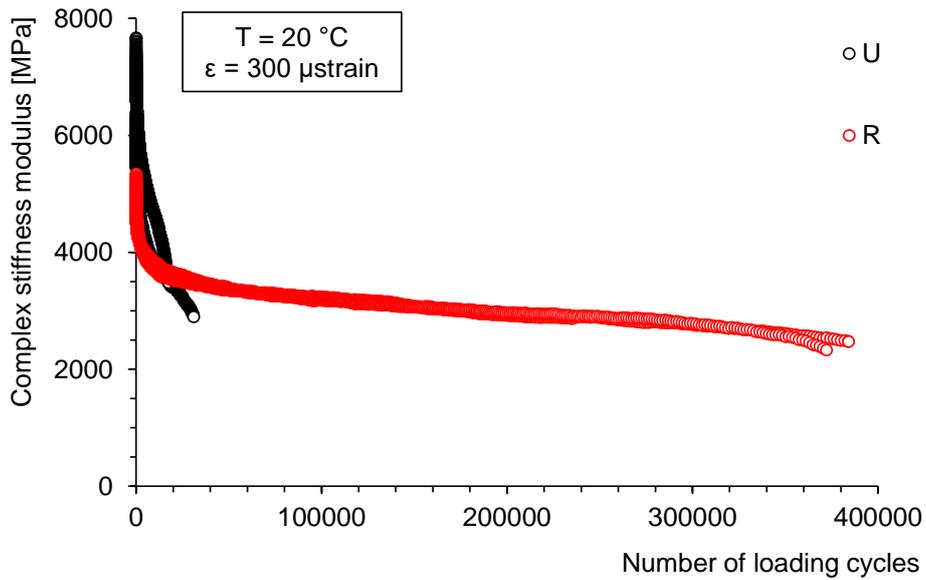


Figura 2.3. Risultati sperimentali prove di fatica flessionale ( $\epsilon = 300 \mu\text{strain}$ )

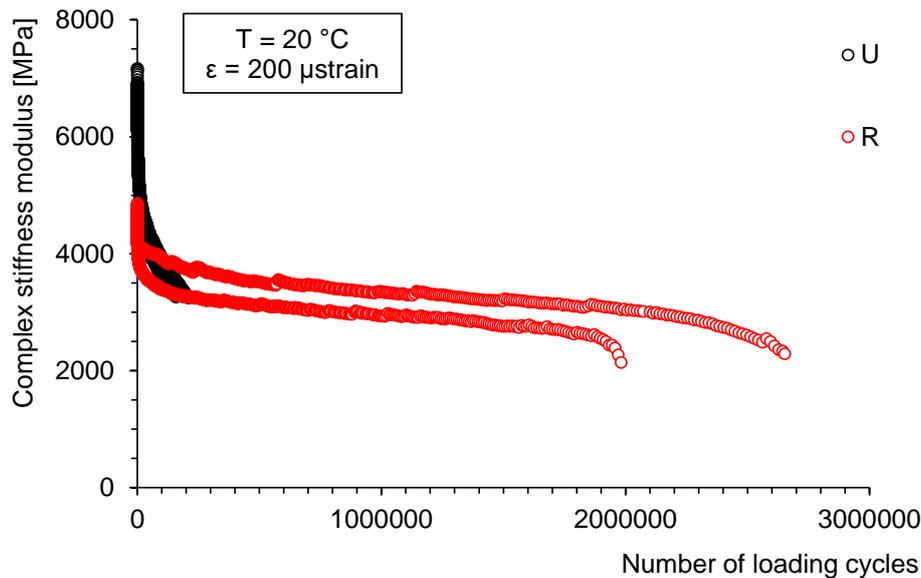


Figura 2.4. Risultati sperimentali prove di fatica flessionale ( $\varepsilon = 200 \mu\text{strain}$ )

Per completezza, i risultati sperimentali già riportati in Tabella 2.2 e nelle Figure 2.2–2.4 sono stati inoltre sintetizzati negli istogrammi di cui alle Figure 2.5–2.7 dove si riportano i valori medi del numero dei cicli a rottura per fatica per le due configurazioni all'interfaccia al variare del livello deformativo applicato, in accordo con quanto prescritto nella norma EN 12697-24. Negli stessi istogrammi si riportano inoltre le relative barre di errore raffiguranti rispettivamente il massimo ed il minimo valore registrato. I grafici mostrano chiaramente, ancora una volta, come la presenza del rinforzo si dimostri capace di garantire una resistenza ai carichi dinamici decisamente superiore rispetto al corrispondente sistema non rinforzato. Nello specifico, si evidenzia una vita a fatica circa 13 volte superiore (+1158%) rispetto a quella dell'analogo sistema non rinforzato nel caso di ridotti livelli deformativi. Tale incremento di prestazioni si attesta addirittura a +2083% (vita a fatica 22 volte superiore) qualora si applichino livelli deformativi elevati, tipici di pavimentazioni con ridotta capacità portante degli strati profondi non legati.

Di conseguenza, le curve di fatica ottenute sulla base dei risultati delle prove dinamiche flessionali e riportate in Figura 2.8 mostrano con chiarezza il beneficio conseguibile dall'adozione del rinforzo studiato rispetto ad un analogo sistema bituminoso non rinforzato, confermando le potenzialità applicative già evidenziate in letteratura.

Nel dettaglio, in accordo con quanto prescritto dalla normativa europea EN 12697-24, si riporta in Tabella 2.3 il valore caratteristico della deformazione  $\varepsilon_6$ , cioè quel livello deformativo a cui corrisponde una vita utile a fatica pari a  $10^6$  (1 milione) di cicli. Tale valore rappresenta infatti la sintesi dei risultati ricavabili dall'osservazione delle curve di fatica di cui alla Figura 2.8 e consente una rapida ed efficace valutazione comparativa fra le configurazioni studiate. Si precisa, in tal senso, che tanto minore risulta il suddetto valore  $\varepsilon_6$ , quanto minore è da considerarsi la resistenza a fatica dei sistemi oggetto di studio. I risultati sperimentali ottenuti confermano, ovviamente, le prestazioni già osservate e discusse in precedenza, evidenziando in maniera netta il differente contributo avverso il

danneggiamento da fatica dimostrato dai sistemi bituminosi investigati. Nello specifico, il valore  $\epsilon_6$  risulta incrementato del 73% grazie all'applicazione del materiale composito di rinforzo rispetto a quello evidenziato nel caso del corrispondente sistema non rinforzato.

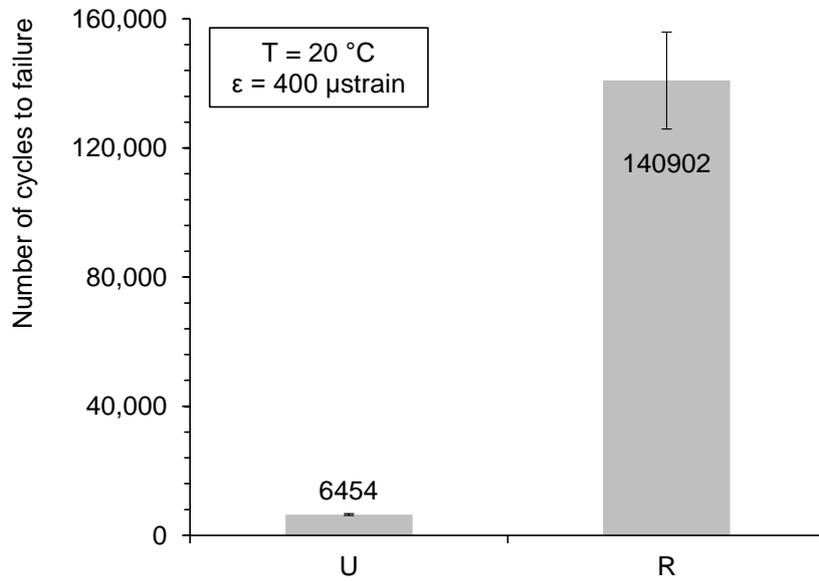


Figura 2.5. Valore medio cicli a rottura per fatica ( $\epsilon = 400 \mu\text{strain}$ ) – EN 12697-24

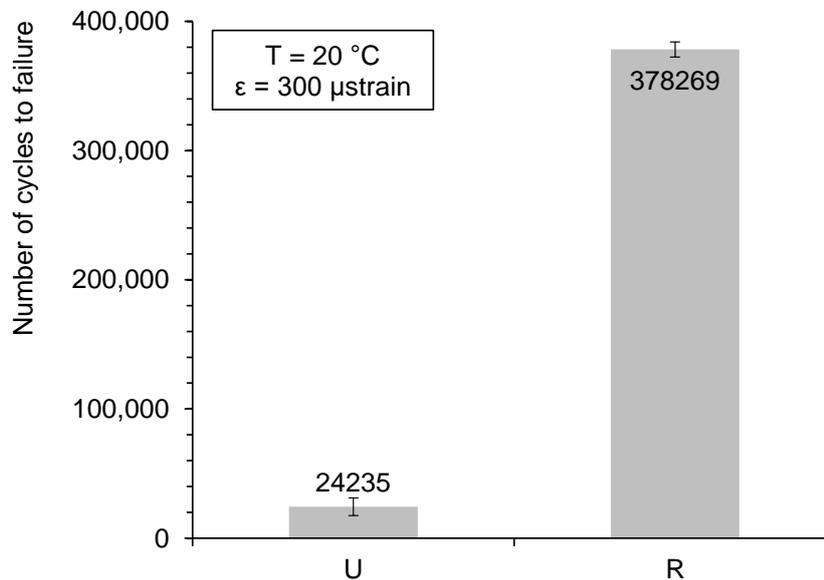


Figura 2.6. Valore medio cicli a rottura per fatica ( $\epsilon = 300 \mu\text{strain}$ ) – EN 12697-24

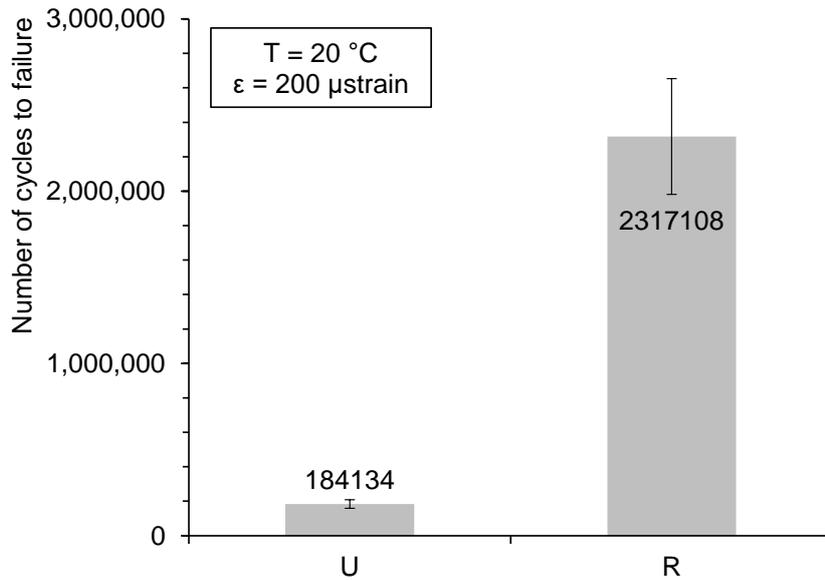


Figura 2.7. Valore medio cicli a rottura per fatica ( $\epsilon = 200 \mu\text{strain}$ ) – EN 12697-24

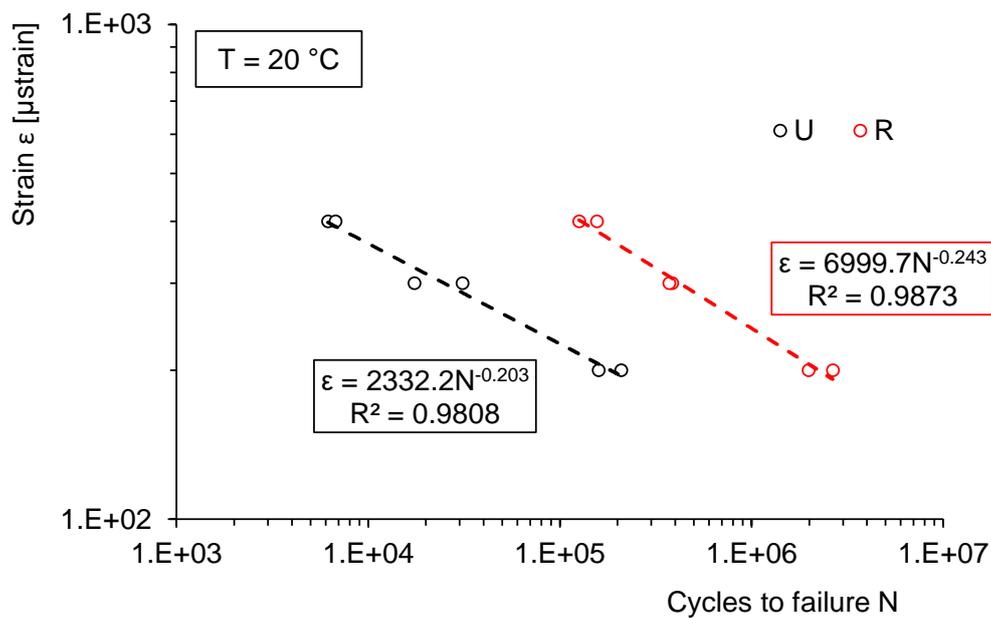


Figura 2.8. Curve di fatica prova 4PB – EN 12697-24

Interface configuration	$\epsilon_6 (T = 20^\circ\text{C})$ $\mu\text{strain}$
U (non rinforzata)	141
R (rinforzata)	244

Tabella 2.3. Sintesi dei risultati a fatica in termini di  $\epsilon_6$  (deformazione che determina una vita utile pari a 1 milione di cicli) – EN 12697-24

### 3. Possibili risvolti applicativi

Come anticipato in premessa, si è cercato nel presente documento di fornire anche delle indicazioni generali per evidenziare il possibile utilizzo ai fini applicativi dei dati ottenuti durante la sperimentazione in laboratorio. In particolare, i risultati sperimentali osservati possono trovare impiego diretto nel processo di dimensionamento delle pavimentazioni stradali dove, appunto, si richiede di assumere le caratteristiche di rigidità dei materiali per il calcolo dello stato tenso-deformativo all'interno della pavimentazione e, successivamente, si perviene alla vita utile della sovrastruttura tramite l'utilizzo di modelli di degrado che mettono in relazione i cicli di carichi che la pavimentazione può sopportare con lo stato tenso-deformativo calcolato. In tale contesto, le leggi di fatica ottenute durante la sperimentazione potrebbero essere preliminarmente utilizzate per il calcolo dei cicli di rottura per fatica del bistrato rinforzato. Maggiori dettagli sul background teorico-sperimentale alla base del dimensionamento razionale delle pavimentazioni bituminose nonché in merito alle modalità e alle limitazioni di utilizzo dei dati ottenuti a valle della ricerca vengono forniti nei paragrafi successivi.

#### 3.1 Il dimensionamento delle pavimentazioni stradali bituminose

Le pavimentazioni debbono essere a tutti gli effetti considerate alla stregua di una qualsiasi altra tipologia di struttura e, pertanto, richiedono un accurato dimensionamento in modo che esse siano in grado di garantire le proprie funzionalità (garantire una marcia sicura e confortevole per gli utilizzatori) per un periodo di tempo prestabilito definito *vita utile*. Ovviamente, tale obiettivo deve essere perseguito minimizzando al contempo i costi di costruzione e manutenzione (evitando cioè il *sovradimensionamento* della struttura).

Al fine di conseguire il suddetto obiettivo occorre, quindi, che la scelta dei materiali costituenti la pavimentazione e il successivo dimensionamento degli spessori sia tale da scongiurare una prematura comparsa di difetti funzionali e strutturali e da garantire, qualora necessario, un'agevole manutenzione della sovrastruttura in termini di costi e tempistiche. Nello specifico, i principali fenomeni di rottura a cui è soggetta una pavimentazione flessibile e dei quali si tiene conto nel suo dimensionamento consistono in fessurazioni, di origine termica o per fatica, e le deformazioni, causate da carenze strutturali degli strati superficiali e/o profondi.

Il dimensionamento delle pavimentazioni stradali nasce e si sviluppa inizialmente come un processo di tipo puramente empirico, cioè in grado di restituire gli spessori dei vari strati della pavimentazione tale per cui non si verificano rotture strutturali nel corso della vita utile non sulla base di calcoli "razionali" di sforzi e deformazioni all'interno della sovrastruttura ma bensì sull'osservazione e sul monitoraggio di tronchi sperimentali in vera grandezza. Le potenzialità applicative di tali sistemi (velocità e facilità di calcolo nonché validazione sul campo) si riducono notevolmente, ponendo seri dubbi sull'affidabilità dei risultati, allorché le caratteristiche dei materiali utilizzati e le condizioni ambientali e di traffico nel caso specifico si differenziano da quelle dei campi prova. Inoltre, non è possibile con tali metodologie, effettuare un dimensionamento efficace quando si utilizzano materiali innovativi o tecniche di costruzione diverse da quelle tradizionali (nel caso specifico, ad esempio, l'introduzione di un sistema di rinforzo).

Di conseguenza, nel corso degli ultimi decenni si sono sviluppati metodi di dimensionamento maggiormente versatili e basati su approcci di tipo razionale. Ad oggi, gli approcci maggiormente avanzati e affidabili consistono nei cosiddetti metodi meccanicistico-empirici (*mechanistic-empirical* M-E).

In estrema sintesi, tale metodo prevede due passaggi fondamentali: il primo di natura meccanicistica ed il secondo maggiormente empirico. Difatti, in prima istanza, applicando la teoria degli elementi finiti o del multistrato elastico, è possibile ricostruire al computer un modello teorico della pavimentazione, rappresentata come sovrapposizione di differenti strati costituiti, a loro volta, da materiali differenti. In tal modo, si riesce ad approssimare in modo più fedele possibile il suo comportamento reale sotto l'applicazione dei carichi termici e veicolari e quindi ad ottenere un quadro delle tensioni e delle deformazioni all'interno della sovrastruttura (Figura 3.1).

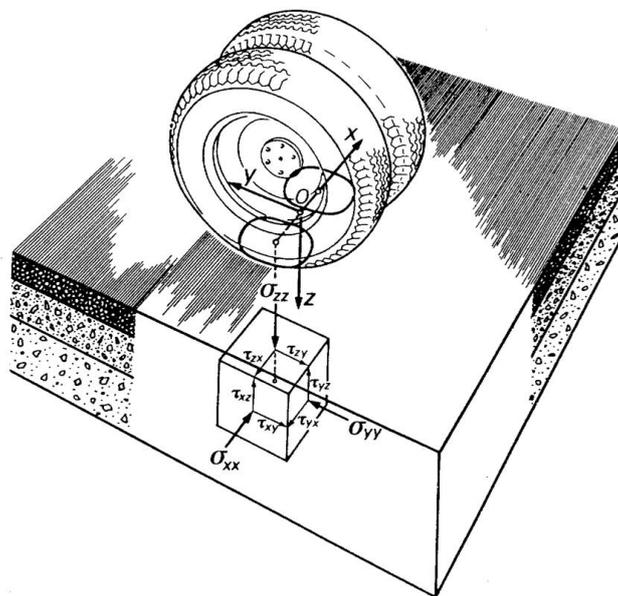


Figura 3.1. Schema di calcolo dello stato tenso-deformativo di una pavimentazione

Successivamente, si procede alla verifica dei vari strati che compongono la pavimentazione secondo opportuni criteri di rottura sulla base delle sollecitazioni e delle tensioni risultanti dal calcolo razionale e caratteristiche per ogni strato. Tali criteri (leggi) di rottura sono generalmente di origine semi-empirica in quanto derivanti dall'aggiustamento di leggi sperimentali di laboratorio mediante osservazioni in sito di tronchi pilota specifici soggetti a determinate condizioni di carico ed ambientali.

Questo consente di associare ad ogni pavimentazione stradale, sottoposta ad un certo traffico, una vita utile, cioè di quel periodo di tempo, o di cicli di carico, al di là del quale la degradazione da essa subita ne rende necessario il rifacimento. In particolare, la durata di una pavimentazione viene correlata al numero massimo di passaggi di un determinato asse standard che è in grado di sopportare prima di raggiungere il collasso strutturale.

Sulla base di quanto premesso, quindi, si puntualizza che il processo progettuale per il dimensionamento strutturale di una pavimentazione stradale è, essenzialmente, un problema di verifica.

Esso, infatti, si basa su cinque passaggi principali:

- la definizione preliminare degli spessori di ogni singolo strato;
- la scelta dei materiali da impiegare;
- la conoscenza dei dati di traffico e delle condizioni climatiche di esercizio;
- il calcolo delle tensioni indotte dall'applicazione dei carichi;
- l'applicazione degli appropriati criteri di verifica.

Qualora le verifiche non fossero soddisfatte, si dovrebbero riconsiderare spessori e materiali e reiterare il processo.

L'approssimazione principale sulla quale si basa il calcolo razionale della pavimentazione consiste nello schematizzare gli strati che la compongono, compreso il sottofondo, come omogenei, isotropi, linearmente elastici e quindi compiutamente caratterizzabili dal modulo di rigidezza ( $E$ ) e dal coefficiente di Poisson ( $\nu$ ).

In tale contesto, quindi, la sperimentazione in oggetto fornisce sia i dati di rigidezza utili alla fase preliminare di calcolo dello stato tenso-deformativo all'interno della sovrastruttura che, al contempo, indicazioni circa il fenomeno di resistenza a fatica degli strati bituminosi rinforzati, consentendo quindi la verifica della pavimentazione.

## 3.2 Caso di studio applicativo

### 3.2.1 Premesse procedurali

Prima di illustrare i dettagli del caso di studio applicativo proposto, occorre evidenziare alcune importanti premesse relative alle ipotesi di calcolo ed alle assunzioni di base.

Il caso di studio applicativo non si riferisce ad un sito specifico bensì intende fornire indicazioni generali spendibili, poi, anche in differenti situazioni specifiche di calcolo. Ciò si è tradotto nel condurre uno studio di tipo comparativo volto a evidenziare le differenze di prestazioni fra analoghe pavimentazioni, con o senza la presenza del rinforzo.

La suddetta assunzione di casistica generica, inoltre, non ha permesso di tenere in considerazione specifiche condizioni di traffico e climatiche; di conseguenza, il calcolo è stato riferito ad un generico asse standard e a generiche condizioni climatiche, senza differenziare il calcolo a seconde delle differenti condizioni stagionali. Ovviamente, il procedimento di calcolo illustrato nel seguito è comunque replicabile modificando le caratteristiche dell'asse standard e le rigidezze dei materiali in funzione delle temperature di riferimento del caso specifico.

Si specifica, infine, che l'adozione *tout-court* delle leggi di rottura per fatica ottenute in laboratorio non sia del tutto attendibile in quanto tali risultati sono fortemente influenzati dal tipo di prova sulla base del quale la legge è ottenuta, nonché dalle modalità di prova e, generalmente, anche dalle dimensioni dei campioni. Tale aspetto comporta, quindi, lo svantaggio che ciò che si ottiene non si configuri completamente come una proprietà intrinseca del materiale. Inoltre, le condizioni di sollecitazione indotte in laboratorio non

sono, inevitabilmente, coerenti con quelle effettivamente esistenti in sito, dove si succedono carichi usualmente diversi con tempi di ripetizione generalmente differenti in condizioni climatiche mutevoli anche nel breve periodo per via dei cambiamenti climatici giornalieri. Di conseguenza, le leggi di fatica di laboratorio vanno sempre “calibrate” mediante applicazione di opportuni coefficienti correttivi (di trasferimento) che consentano di “allineare” le prestazioni misurate in laboratorio con quelle effettivamente riscontrate in sito.

Tutto ciò premesso, nel caso in oggetto è stata utilizzata, sia per il caso non rinforzato che per quello rinforzato, la stessa legge standard di fatica, pari a quella suggerita dal software di calcolo utilizzato e di seguito descritto. Successivamente, alla luce dei risultati sensibilmente superiori evidenziati in laboratorio, si è fatto riferimento alle leggi di fatica trovate nello studio in oggetto per poter valutare l'entità dell'incremento di vita utile da tener in considerazione per il caso rinforzato rispetto a quello non rinforzato.

Sulla base di tali premesse, il procedimento di calcolo adottato per lo studio comparativo, dettagliato nel seguito, può essere preliminarmente schematizzato come segue:

- adozione di una pavimentazione (materiali e spessori) standard di riferimento per lo studio comparativo (tale assunzione è stata effettuata sulla base del Catalogo delle Pavimentazioni Stradali redatto dal CNR);
- ipotesi di uno specifico asse standard e di condizioni climatiche (temperatura) costanti;
- assunzione delle caratteristiche di rigidità per i materiali bituminosi sulla base dei risultati ottenuti nello studio di laboratorio di cui al precedente capitolo (per i materiali granulari e per il sottofondo si sono adottati valori standard di riferimento);
- calcolo dello stato tenso-deformativo all'interno della pavimentazione tramite software commerciale dedicato;
- verifica a fatica dei conglomerati bituminosi sulla base dei risultati ottenuti nello studio di laboratorio di cui al precedente capitolo (per i materiali granulari e per il sottofondo si sono adottati leggi standard di riferimento);
- valutazione del contributo del rinforzo alla vita utile della pavimentazione;
- quantificazione della possibile riduzione di spessore della pavimentazione grazie all'utilizzo del rinforzo.

### 3.2.2 Dettaglio di calcolo

Come anticipato, poiché il caso di studio proposto non si riferisce ad una situazione progettuale specifica, si è deciso di adottare uno schema di pavimentazione standard facendo riferimento al “*Catalogo delle Pavimentazioni Stradali*” redatto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). In particolare, si è scelto di selezionare un caso comune di strada tipo 6 (*strada urbana di scorrimento*) per una pavimentazione flessibile da costruire su un sottofondo con caratteristiche di portanza intermedie, cioè caratterizzate da un modulo di rigidità pari a 90 MPa, e sottoposto ad un carico di traffico nella sua vita utile medio-alto rispetto ai livelli previsti nel catalogo (nello specifico pari a 4,000,000 di passaggi di mezzi commerciali, cioè con massa superiore alle 3 tonnellate).

La Figura 3.2 sottostante evidenzia il pacchetto selezionato come riferimento per lo studio comparativo in questione; come si evince, la pavimentazione risulta formata da strati superficiali in conglomerato bituminoso per uno spessore complessivo pari a 26 cm (5 cm di usura, 6 cm di binder e 15 cm di base) e 15 cm di fondazione in misto granulare. Al fine

dello studio comparativo, la pavimentazione rinforzata alternativa è stata ottenuta ipotizzando semplicemente l'interposizione del rinforzo fra gli strati di binder e base, ad una profondità tale, quindi, da evitare eventuali problemi di *debonding* all'interfaccia per via dei ridotti sforzi tangenziali presenti, garantendo al contempo l'assorbimento di importanti sforzi di trazione. La Figura 3.3 riporta schematicamente le due pavimentazioni analizzate.

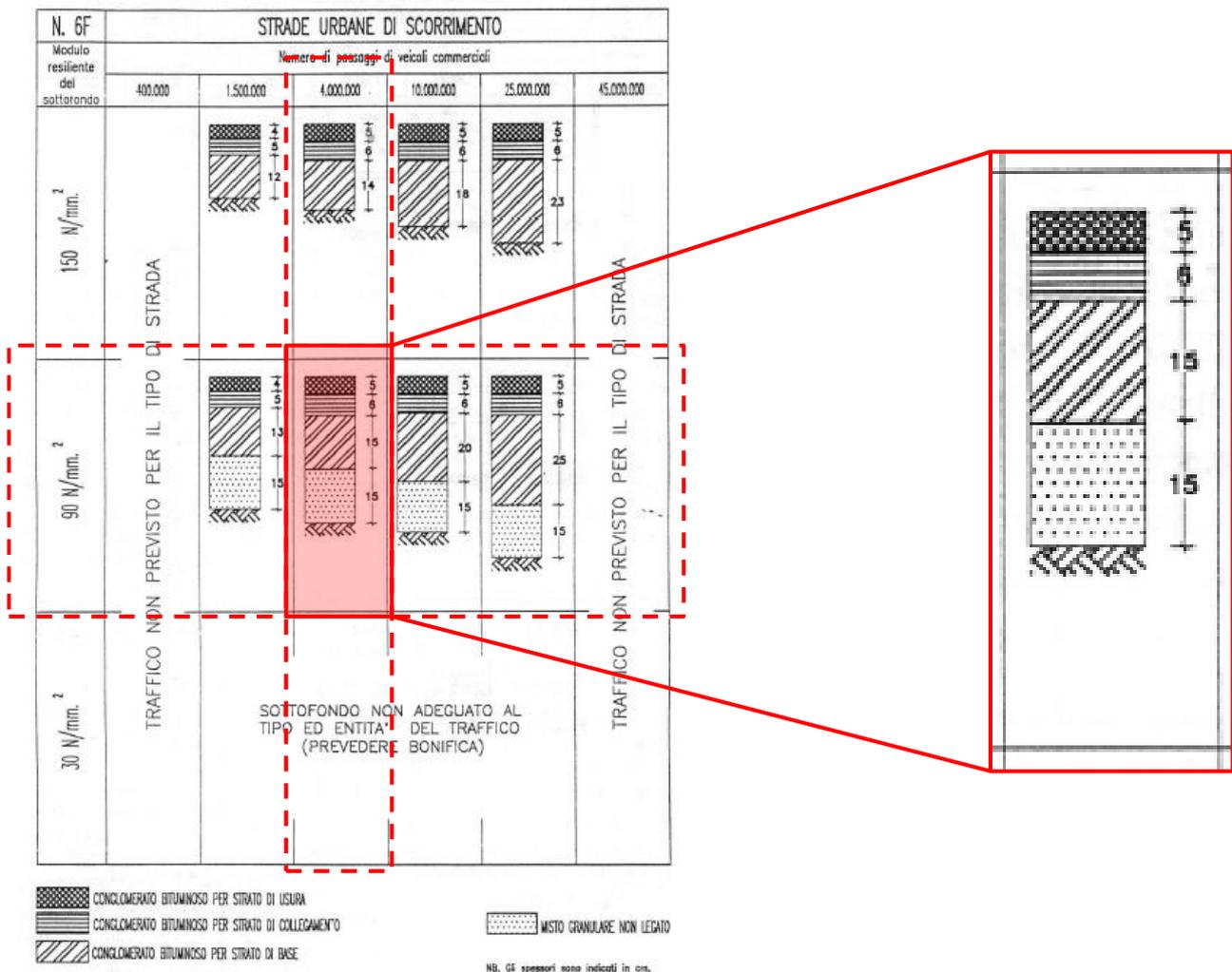


Figura 3.2. Pavimentazione di riferimento (cfr. catalogo delle pavimentazioni)

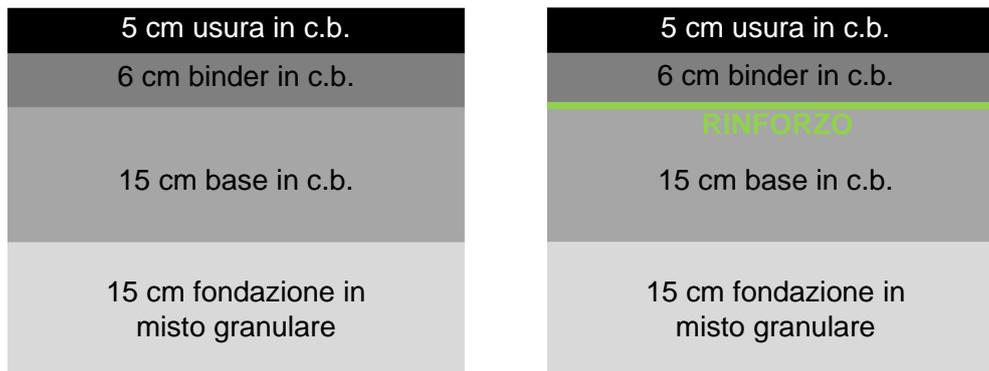


Figura 3.3. Schema delle pavimentazioni analizzate: riferimento (sx) e rinforzata (dx)

La determinazione dello stato tenso-deformativo all'interno della pavimentazione è stata effettuato mediante il software mePADS, sviluppato dal centro ricerche sudafricano CSIR. Tale software si basa sul metodo di calcolo razionale delle pavimentazioni (*South Africa Mechanistic Design Method*) che viene utilizzato per il dimensionamento razionale di pavimentazioni sin dagli anni '80 e continua ad evolversi anche grazie alle esperienze in vera grandezza effettuate negli ultimi decenni attraverso simulatori di traffico (*Heavy Vehicle Simulators*) con i quali si sono analizzate molteplici pavimentazioni. Il software permette di calcolare le tensioni, le deformazioni e gli spostamenti in corrispondenza dei punti critici di un sistema di tipo "multistrato elastico" sottoposto a uno o più carichi uniformemente distribuiti su di un'impronta circolare. Tali punti critici sono determinati sulla base del tipo di materiale usato in ogni singolo strato. Inoltre, sulla base dello spessore degli strati, delle loro caratteristiche meccaniche e dei relativi modelli previsionali di degrado il software restituisce il calcolo del numero di cicli di carico a rottura di ogni singolo strato. Si ricorda, in tal senso, che nel caso in esame i cicli a rottura per i conglomerati bituminosi sono stati calcolati utilizzando le curve di fatica ottenute in laboratorio mentre, per i restanti strati non legati, si è fatto riferimento alle leggi di rottura "standard" implementate all'interno del software.

In sintesi, i dati di input richiesti dal software mePADS sono:

- numero ed entità dei carichi;
- categoria di strada;
- regione climatica;
- massima profondità dell'ormai ammessa;
- numero e spessore degli strati;
- tipo di materiale relativo ad ogni strato;
- modulo di Young e coefficiente di Poisson di ogni strato;
- coordinate dei punti dove si vuole verificare lo stato tenso-deformativo.

A tal proposito, le Figure 3.4 e 3.5 illustrano le relative schermate del software nelle quali inserire le informazioni di input necessarie ai fini calcolo razionale della pavimentazione.

Il procedimento di calcolo alla base di mePADS fa riferimento agli standard definiti nelle “Guidelines for Road Construction Materials” per i materiali da costruzione stradale in Sud Africa. I codici per le principali tipologie di materiale sono mostrati in Figura 3.6.

Il suddetto documento suggerisce, inoltre, dei valori indicativi da assumere per le caratteristiche meccaniche (modulo elastico e coefficiente di Poisson) dei diversi materiali sottolineando, però, che sarebbe più opportuno determinare tali caratteristiche attraverso indagini sperimentali di laboratorio, come effettivamente avvenuto nel caso in oggetto.

Ognuno di questi materiali sarà caratterizzato da una propria modalità di rottura alla quale è associata una specifica legge di rottura. In particolare, per i conglomerati bituminosi si assume che la rottura avvenga, appunto, a causa della fessurazione da fatica che si sviluppa a seguito del passaggio ripetuto dei carichi veicolari e la cui legge risulta regolata dalla massima deformazione di trazione orizzontale  $\epsilon_t$  mentre i materiali granulari e quelli terrosi di sottofondo giungono a fine vita utile per via delle eccessive deformazioni permanenti causate dalle tensioni o dalle deformazioni di compressione all’interno in sommità degli strati stessi.

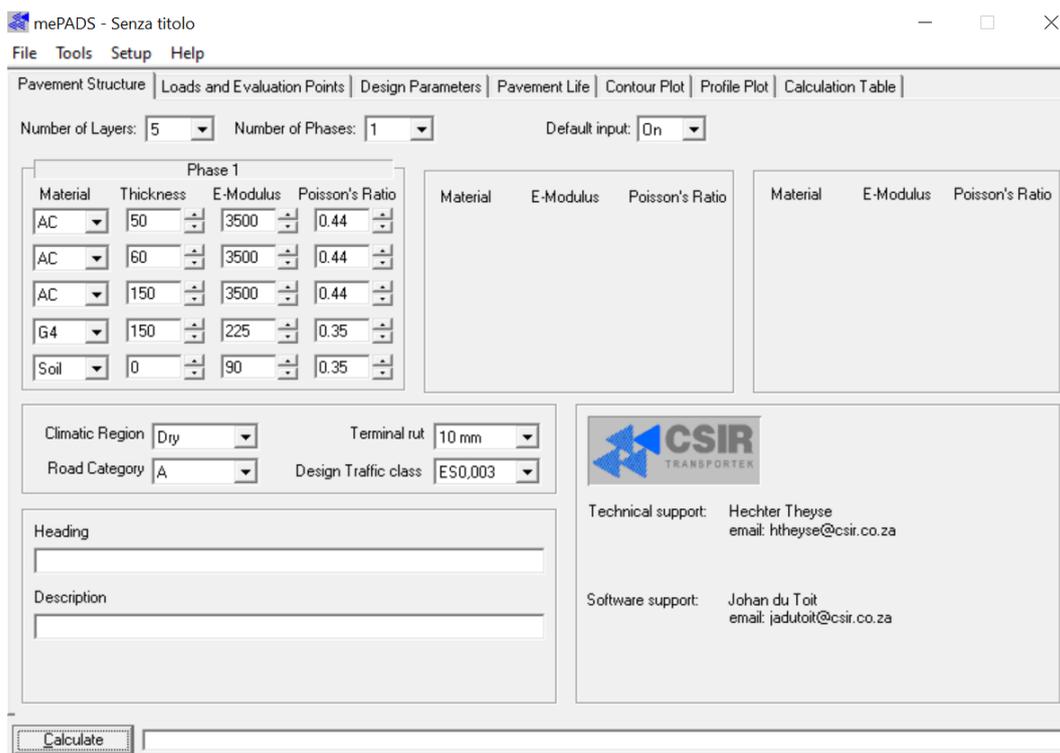


Figura 3.4. Schermata principale software mePADS

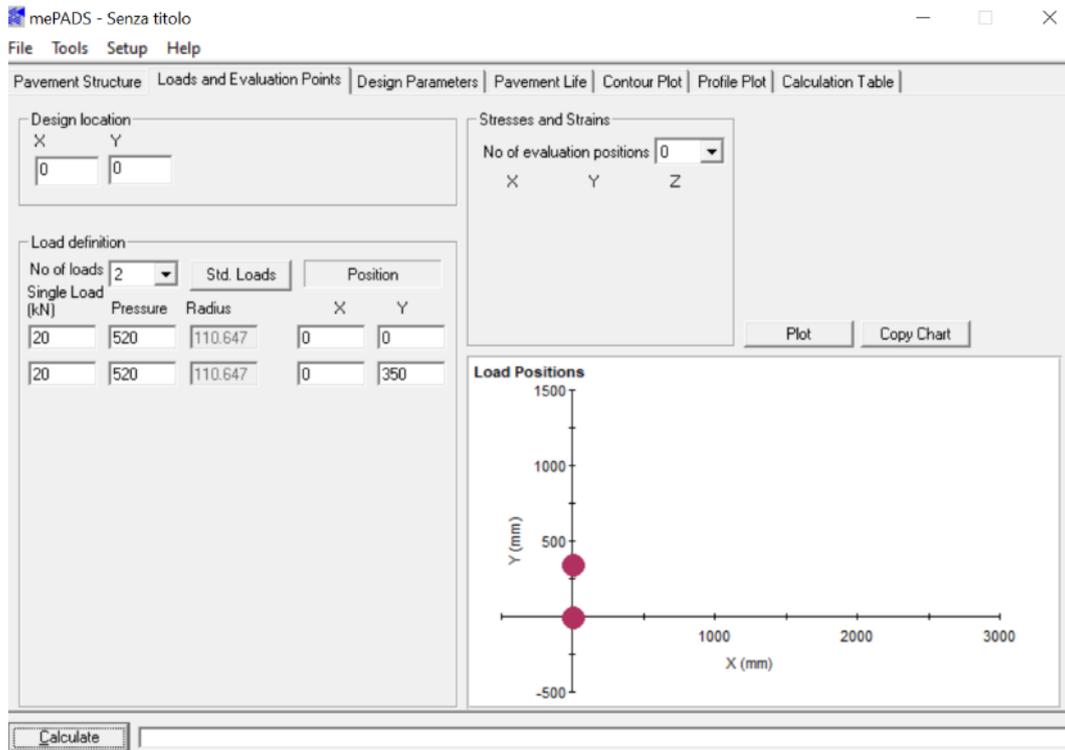


Figura 3.5. Schermata di definizione dei carichi e dei punti di controllo (mePADS)

Symbol	Code	Material	Abbreviated specification	Symbol	Cod	Material	Abbreviated specification
	G1	Graded crushed stone	Dense-graded, unweathered crushed stone; Max size 37,5 mm; 88% apparent density; PI < 4,0 (min 6 tests)		C1	Cemented crushed stone	UCS 6 - 12 MPa at 100 % mod. AASHTO compaction; at least G2 before treatment
	G2	Graded crushed stone	Dense-graded crushed stone; Max size 37,5 mm; 100 - 102 % mod. AASHTO or 85% bulk density; PI < 6,0 (min 6 tests)		C2	Cemented crushed stone	UCS 3 - 6 MPa at 100 % mod. AASHTO compaction; at least G2/G4 before treatment
	G3	Graded crushed stone	Dense-graded crushed stone and soil binder; max size 37,5 mm; 98 - 100% mod. AASHTO; PI < 6		C3	Cemented natural gravel	UCS 1,5 - 3,0 MPa and ITS • 250 kPa at 100 % mod. AASHTO; max size 63 mm; PI • 6 after treatment
	G4	Natural Gravel	CBR• 80; max size 53 mm; 98 - 100 mod. AASHTO; PI < 6; Swell 0,2 @ 100 % mod. AASHTO		C4	Cemented natural gravel	UCS 0,75 - 1,5 MPa and ITS • 200 kPa at 100 % mod AASHTO; max size 63 mm; PI • 6 after treatment
	G5	Natural Gravel	CBR• 45; max size 63 mm or $\frac{b}{2}$ of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 10; Swell 0,5 @ 100 % mod. AASHTO		EBM	Bitumen emulsion	0,6 - 1,5 % residual bitumen
	G6	Natural Gravel	CBR• 25; max size 63 mm or $\frac{b}{2}$ of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 12 or 2(GM)+10; Swell 1,0 @ 100 % mod. AASHTO		EBS	modified gravel	1,5 - 5,0 % residual bitumen
	G7	Gravel-soil	CBR• 15; max size $\frac{b}{2}$ of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 12 or 2(GM)+10; Swell 1,5 @ 100 % mod. AASHTO		BC1	Hot-mix asphalt base course	Continuously graded; max size 53 mm
	G8	Gravel-soil	CBR• 10 at in-situ density; max size $\frac{b}{2}$ of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 12 or 2(GM)+10; Swell 1,5 @ 100 % mod. AASHTO		BC2	base course	Continuously graded; max size 37,5 mm
	G9	Gravel-soil	CBR• 7 at in-situ density; max size $\frac{b}{2}$ of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 12 or 2(GM)+10; Swell 1,5 @ 100 % mod. AASHTO		BC3		Continuously graded; max size 26,5 mm
	G10	Gravel-soil	CBR• 3 at in-situ density; max size $\frac{b}{2}$ of layer thickness; density as prescribed for layer of usage or 90% mod. AASHTO		BS		Semi-gap graded; max size 37,5 mm
					PPC	Portland concrete cement	Modulus of rupture • 4,5 MPa; max particle size • 75 mm
					AG	Asphalt	Gap graded
					AC	surfacing layers	Continuously graded
					AS		Semi-gap graded
					AO		Open graded
					AP		Porous (drainage) asphalt

Figura 3.6. Principali tipologie di materiali previsti nel metodo di calcolo sudafricano

Ai fini del calcolo, come detto, occorre assumere un carico di riferimento (asse standard) al quale riferire lo stato tenso-deformativo all'interno della pavimentazione. Nel caso in oggetto si è assunto l'asse standard suggerito dal software mePADS e che generalmente viene assunto come riferimento anche nel nostro Paese, cioè l'asse standard da 80 kN a ruote gemellate con carico ripartito uniformemente sulle singole impronte e pressione di gonfiaggio degli pneumatici pari a 520 kPa.

Per quanto riguarda, invece, il numero e lo spessore dei vari strati nonché la tipologia di materiale relativo ad ogni strato, tali informazioni sono state già dettagliate con precisione in precedenza e schematizzate in Figura 3.3. Ciò che rimane da stabilire, quindi, ai fini del calcolo razionale, sono le caratteristiche elastiche dei materiali che compongono la sovrastruttura stradale (modulo di Young e coefficiente di Poisson). Come accennato, si è scelto di assumere dei moduli di rigidezza per gli strati in conglomerato bituminoso che tenessero conto delle determinazioni di laboratorio in termini di riduzione della rigidezza a seguito dell'introduzione del rinforzo (cfr. capitolo 2) facendo in ogni caso riferimento, così come per gli altri strati, ai valori suggeriti dal software impiegato per il calcolo.

In particolare, il **modulo di rigidezza del sottofondo è stato assunto pari a 90 MPa** coerentemente con quanto stabilito dal catalogo delle pavimentazioni CNR dal quale si è selezionata la pavimentazione oggetto di studio.

**Per lo strato di fondazione, invece, si è adottato un modulo di rigidezza pari a 225 MPa** facendo riferimento al materiale codificato come G4 dal metodo sudafricano (Figura 3.6), un materiale granulare di qualità e caratteristiche meccaniche medio-alte.

Per il conglomerato bituminoso, infine, si dovrebbero assumere caratteristiche meccaniche differenti al variare della temperatura di riferimento e della frequenza di applicazione del carico, cioè in funzione delle variabilità stagionali e delle velocità veicolari, a causa delle caratteristiche termoplastiche e viscoelastiche del legante bituminoso. Solitamente, per semplificare il calcolo, si assume una frequenza di riferimento come se l'asse standard passasse sempre alla stessa velocità e con medesimo distanziamento mentre si suddivide il calcolo nelle 4 stagioni per poi assumere poi un accumulo lineare del danno. Nel presente caso, volendo utilizzare i riscontri di laboratorio tenendo al contempo conto, per coerenza, dei valori di rigidezza suggeriti dal software mePDAS, si è adottato un modulo di rigidezza pari a 3500 MPa per gli strati in conglomerato bituminoso non rinforzato ipotizzando una riduzione del 35% della rigidezza per lo strato di conglomerato bituminoso con interposizione del rinforzo (ipotesi supportata dalle evidenze sperimentali di laboratorio come evidenziato in Tabella 2.1). Tale riduzione, in laboratorio misurata per un bistrato di soli 5 cm di spessore, è stata quindi mediata sull'intero spessore del bistrato (binder+base) rinforzato ottenendo in definitiva una riduzione del 10% della rigidezza dell'intero bistrato (ipotesi ragionevolmente cautelativa). Coerentemente con l'approccio appena descritto, quindi, la pavimentazione rinforzata è stata schematizzata esattamente allo stesso modo e con le stesse assunzioni, fatto salvo la riduzione della **rigidezza del sistema bistrato rinforzato** per il quale si è assunto un **modulo di rigidezza pari a 3150 MPa**. Per tutti i materiali è stato assunto un valore del coefficiente di Poisson coincidente con quello suggerito dal mePADS e specificatamente pari a 0.44 per i conglomerati bituminosi e a 0.35 per i materiali non legati sottostanti.

In accordo con le precedenti assunzioni, la Figura 3.7 sintetizza le caratteristiche di ogni singolo strato che compone sia la pavimentazione non rinforzata che quella rinforzata.

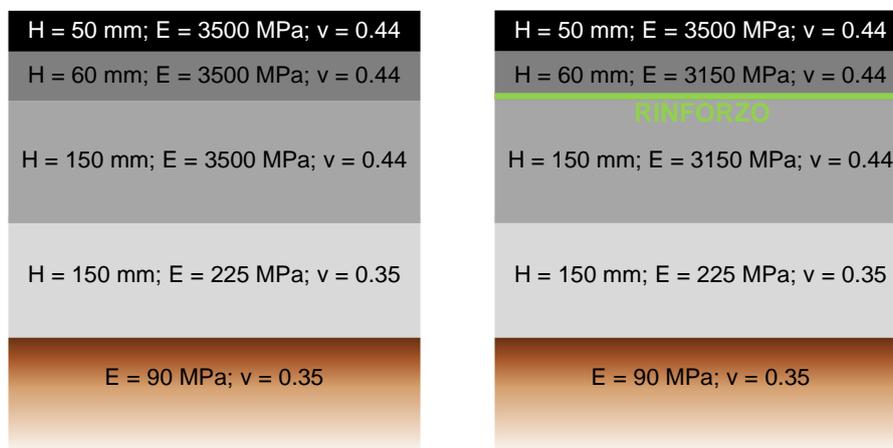


Figura 3.7. Parametri di calcolo per la pavimentazione di riferimento (sx) e rinforzata (dx)

Sulla base dei parametri di calcolo assunti, è stato possibile procedere alla determinazione dei valori critici dello stato tenso-deformativo per ogni strato delle due pavimentazioni analizzate. Ciò ha consentito, poi, di determinare la durata di ciascuno strato coerentemente con i criteri di calcolo illustrati e, di conseguenza, la vita utile dell'intera pavimentazione intesa come coincidente con quella minore evidenziata dai vari strati componenti (come ovvio, infatti, la sovrastruttura giunge a fine vita utile non appena uno degli strati che la compone arriva a rottura).

In particolare, le Tabelle 3.1 e 3.2 riportano i valori dei parametri critici utilizzati per la verifica di ciascuno strato delle due pavimentazioni considerate.

Layer No.	Material code	ASPHALT	GRANULAR			SUBGRADE
		$\epsilon_t$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	Safety Factor	$\epsilon_v$
1	AC	4.54	-25.45	9.62	6.35	-211.66
2	AC	25.91				
3	AC	79.28				
4	G4					
5	Soil					

Tabella 3.1. Valori critici dello stato tenso-deformativo – pavimentazione non rinforzata

Layer No.	Material code	ASPHALT	GRANULAR			SUBGRADE
		$\epsilon_t$	$\sigma_1$	$\sigma_3$	Safety Factor	$\epsilon_v$
1	AC	7.61				
2	AC	29.94				
3	AC	84.51				
4	G4		-26.48	10.39	6.04	
5	Soil					-219.93

Tabella 3.2. Valori critici dello stato tenso-deformativo – pavimentazione rinforzata

Dall'osservazione delle tensioni e delle deformazioni riportate nelle tabelle sovrastanti, sottolineando come i valori negativi si riferiscano a stati di compressione mentre, viceversa, valori positivi traducano stati tenso-deformativi di trazione, è possibile notare come la riduzione di rigidità del bistrato rinforzato dovuto all'introduzione del geocomposito comporti un maggiore livello di sollecitazione per tutti gli strati interessati. Ciò, ovviamente, si traduce in una variazione della vita utile di ciascuno strato della pavimentazione dal caso non rinforzato di riferimento a quello rinforzato oggetto di studio. In particolare, poiché per gli strati di fondazione e di sottofondo si utilizzerà lo stesso criterio di rottura nei due casi analizzati in quanto non c'è nessuna variazione nei materiali, tali strati evidenzieranno inevitabilmente un decremento della durata. Diversamente, alla luce degli studi di laboratorio illustrati nel capitolo precedente, per il conglomerato bituminoso si dovranno adottare criteri di rottura differenti in quanto si è osservato come il bistrato rinforzato sia caratterizzato non solo da una ridotta rigidità ma anche da una resistenza a fatica sensibilmente migliore. Per cui, per gli strati profondi non legati si sono utilizzati i criteri di rottura implementati all'interno del software mePADS mentre per il conglomerato bituminoso si è proceduto diversamente; in particolare, per il caso non rinforzato standard, si è utilizzata la vita a fatica restituita dalla legge implementata nel metodo sudafricano mentre per il caso rinforzato tale durata calcolata utilizzando *tout-court* il criterio di rottura del software mePADS è stata poi amplificata di un fattore pari a quello desumibile dalle curve di fatica calcolate in laboratorio e riportate nella precedente Figura 2.8 in corrispondenza del valore di deformazione di trazione derivante dal calcolo razionale.

Nel dettaglio, quindi, per il calcolo della vita a fatica del conglomerato bituminoso rinforzato si è proceduto moltiplicando la vita utile calcolata con il software MePADS per un coefficiente pari al rapporto fra le vite a fatica del sistema rinforzato e di quello non rinforzato utilizzando la deformazione di trazione alla base nel caso rinforzato (84.51  $\mu$ strain) all'interno delle rispettive leggi di fatica. I relativi calcoli sono illustrati di seguito, dove le equazioni (1) e (2) riportano le leggi di fatica rispettivamente per il caso rinforzato e non rinforzato emerse dalle prove di laboratorio (cfr. Figura 2.8) mentre nelle successive equazioni (3) e (4) viene inserito il valore della deformazione di trazione  $\epsilon$  calcolato risolvendo il multistrato elastico nel caso rinforzato ricavando, di conseguenza, il coefficiente moltiplicativo K (Eq. 5) per i cicli di rottura derivanti dal criterio di rottura standard MePADS:

$$\epsilon = 2332.2N_u^{-0.203} \text{ (bistrato non rinforzato – legge di laboratorio)} \quad (1)$$

$$\epsilon = 6999.7N_r^{-0.243} \text{ (bistrato rinforzato – legge di laboratorio)} \quad (2)$$

$$N_u = (2332.2/84.51)^{1/0.203} = \mathbf{1.25E+07 \text{ (bistrato non rinforzato – legge di laboratorio)}} \quad (3)$$

$$N_r = (6999.7/84.51)^{1/0.243} = \mathbf{7.83E+07 \text{ (bistrato rinforzato – legge di laboratorio)}} \quad (4)$$

$$K = N_r/N_u = \mathbf{6.25 \text{ (fattore moltiplicativo vita a fatica bistrato rinforzato)}} \quad (5)$$

Alla luce delle considerazioni e dei calcoli sovrastanti le Tabelle 3.3 e 3.4 riassumono rispettivamente i risultati ottenuti per la pavimentazione di riferimento e per quella rinforzata in termini di vita utile di ciascuno strato secondo il corrispondente criterio di rottura.

Pavimentazione non rinforzata			
Codice	Materiale	Spessore (mm)	Cicli di carico a rottura
AC	Usura in conglomerato bituminoso	50	<b>2.61E+14</b>
<b>AC</b>	<b>Bistrato non rinforzato in conglomerato bituminoso</b>	<b>210</b>	<b>4.13E+07</b>
G4	Fondazione in misto granulare	150	<b>1.00E+15</b>
Soil	Sottofondo	-	<b>1.11E+10</b>

Tabella 3.3. Cicli di carico a rottura pavimentazione non rinforzata

Pavimentazione rinforzata			
Codice	Materiale	Spessore (mm)	Cicli di carico a rottura
AC	Usura in conglomerato bituminoso	50	<b>1.86E+13</b>
<b>AC</b>	<b>Bistrato rinforzato in conglomerato bituminoso</b>	<b>210</b>	<b>2.04E+08</b>
G4	Fondazione in misto granulare	150	<b>1.00E+15</b>
Soil	Sottofondo	-	<b>7.54E+09</b>

Tabella 3.4. Cicli di carico a rottura pavimentazione rinforzata

Si precisa nuovamente come la durata a fatica del bistrato rinforzato ( $N_r$ ) sia stata calcolata moltiplicando la durata restituita dal metodo sudafricano ( $N_{MePADS}$ ), valida per i materiali non rinforzati soggetti a quel livello di sollecitazione ( $84.51 \mu\text{strain}$ ), per il coefficiente amplificativo  $K$  desunto dalle osservazioni di laboratorio e calcolato in Eq. (5):

$$N_r = N_{MePADS} \times K = 3.26E+07 \times 6.25 = \mathbf{2.04E+08} \quad (6)$$

Come anticipato, dall'analisi di tali risultati, ottenuti a seguito del calcolo razionale eseguito con il software mePADS, si evince come le pavimentazioni considerate giungano a rottura per effetto del danno da fatica indotto sul bistrato bituminoso formato dagli strati di binder e base, indipendentemente dalla presenza del rinforzo. Tuttavia, la presenza del rinforzo, nonostante la minore rigidità conferita al bistrato, consente un sensibile **incremento della**

**vita utile** a fatica del bistrato (e di conseguenza dell'intera pavimentazione) **stimato pari a circa il 400%**: per portare a rottura la pavimentazione, difatti, sono necessari circa 200 milioni di passaggi dell'asse standard da 80 kN invece dei circa 40 milioni ai quali resisterebbe la stessa pavimentazione senza l'interposizione del rinforzo.

Si sottolinea, ancora una volta, come tale incremento di vita utile a fatica si riferisca ad una particolare situazione di temperatura (condizioni climatiche) e frequenza di applicazione del carico (velocità e distanziamento veicolare). Un calcolo rigoroso dovrebbe considerare quantomeno differenti periodi stagionali applicando poi la teoria di accumulo del danno.

Ad ogni modo, volendo provare a quantificare, a puro titolo comparativo, in termini di traffico di mezzi le prestazioni delle pavimentazioni ottenute in termini di numero di passaggi di asse standard, occorre assumere un target di vita utile (in questo esercizio posto pari a 25 anni) ipotizzando un tasso di crescita annuo del traffico (qui ipoteticamente assunto pari al 3%) e considerando il transito di una sola tipologia di mezzo pesante transitante (in assenza di informazioni circa il reale spettro di traffico). A tal proposito, si è deciso di far riferimento ad un autotreno a quattro assi così come descritto nel già citato Catalogo delle Pavimentazioni (Figura 3.8) sul cui asse anteriore vengono scaricati 60 kN e nei restanti 100 kN ciascuno.

Tab. 2 - Tipi di veicoli commerciali, numero di assi, distribuzione dei carichi per asse.

Tipo di veicolo	N° Assi	Distribuzione dei carichi per asse in KN					
1) autocarri leggeri	2	↓10	↓20				
2) " "	"	↓15	↓30				
3) autocarri medi e pesanti	"	↓40	↓80				
4) " " "	"	↓50	↓110				
5) autocarri pesanti	3	↓40	↓80	↓80			
6) " "	"	↓60	↓100	↓100			
7) autotreni e autoarticolati	4	↓40	↓90	↓80	↓80		
8) " "	"	↓60	↓100	↓100	↓100		
9) " "	5	↓40	↓80	↓80	↓80	↓80	
10) " "	"	↓60	↓90	↓90	↓100	↓100	
11) " "	"	↓40	↓100		↓80	↓80	↓80
12) " "	"	↓60	↓110		↓90	↓90	↓90
13) mezzi d'opera	"	↓50	↓120		↓130	↓130	↓130
14) autobus	2	↓40	↓80				
15) " "	2	↓60	↓100				
16) " "	2	↓50	↓80				

Figura xx. Tipo mezzo pesante considerato (tabella da Catalogo delle Pavimentazioni)

Utilizzando quindi il noto coefficiente di equivalenza per la trasformazione in assi standard (e viceversa) che si assume nella pratica uguale al rapporto fra l'asse in questione e quello standard elevato ad una potenza del 4° ordine, si ottiene che ogni singolo passaggio dell'autotreno di riferimento equivale a 7.641 passaggi dell'asse standard da 80 kN. Quindi, richiamando le ipotesi di 25 anni di vita utile e 3% di tasso di crescita del traffico, la pavimentazione non rinforzata di riferimento risulterebbe in grado di sopportare un passaggio giornaliero medio di meno di 400 autotreni di riferimento mentre quella rinforzata arriverebbe a sopportare quasi 2000 garantendo la stessa vita utile a fatica.

Per comprendere meglio la portata di una tale differenza di prestazioni è possibile ragionare a ritroso per quantificare la possibile riduzione di spessore del bistrato in conglomerato bituminoso tale da garantire comunque una vita utile almeno pari a quella della corrispondente pavimentazione non rinforzata (soluzione iso-durata), capace cioè di soportare lo stesso numero di passaggi di carico pur con minor spessore complessivo.

Procedendo, difatti, alla risoluzione del multistrato elastico rinforzato di cui alla Figura 3.7 attraverso il software mePADS riducendo progressivamente lo spessore del bistrato bituminoso di binder e base, si osserva che è possibile ridurre 5 cm di conglomerato bituminoso (-19%) riuscendo ad ottenere comunque una vita utile non inferiore (+0.6%) di quella relativa alla corrispondente pavimentazione non rinforzata.

Tale riduzione è particolarmente significativa dal punto di vista tecnico, economico ed ambientale in quanto, non solo permette di **risparmiare più di un quintale di conglomerato bituminoso per ogni m<sup>2</sup> di superficie di stesa**, ma consente altresì di **realizzare lo strato di base con un'unica "passata"**, ovvero di stendere e compattare l'intero spessore (pari a 10 cm) in un'unica soluzione, operazione non possibile per l'"originale" spessore di 15 cm.

Le Figura 3.8 mostra la pavimentazione rinforzata capace di garantire la stessa vita utile mentre la Tabella 3.5 e la Tabella 3.6 mostrano rispettivamente lo stato tenso-deformativo critico e le corrispondenti vite utili dei vari strati della pavimentazione analizzata.

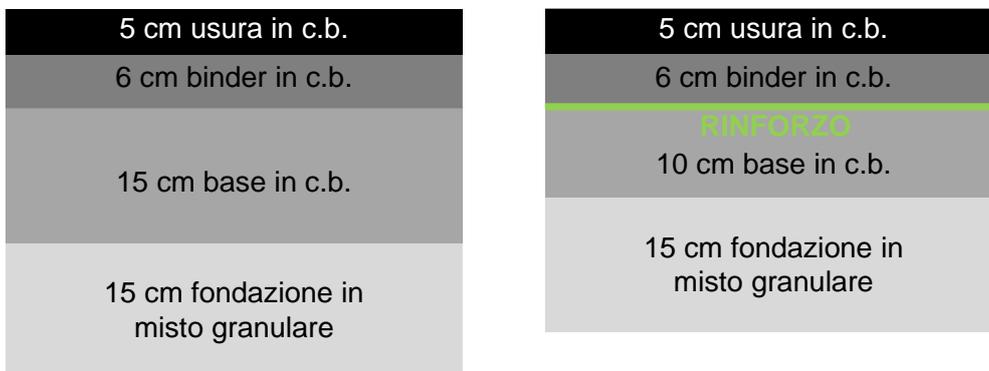


Figura 3.8. Schema delle pavimentazioni aventi stessa vita utile

Layer No.	Material code	ASPHALT	GRANULAR		Safety Factor	SUBGRADE
		$\epsilon_t$	$\sigma_1$	$\sigma_3$		$\epsilon_v$
1	AC	4.07				
2	AC	38.49				
3	AC	114.26				
4	G4		-36.07	13.54	4.49	
5	Soil					-292.04

Tabella 3.5. Stato tenso-deformativo critico – pavimentazione rinforzata iso-durata

Pavimentazione rinforzata iso-durata			
Codice	Materiale	Spessore (mm)	Cicli di carico a rottura
AC	Usura in conglomerato bituminoso	50	<b>4.60E+14</b>
<b>AC</b>	<b>Bistrato rinforzato in conglomerato bituminoso</b>	<b>160</b>	<b>4.16E+07</b>
G4	Fondazione in misto granulare	150	<b>1.00E+15</b>
Soil	Sottofondo	-	<b>4.42E+08</b>

Tabella 3.6. Cicli di carico a rottura pavimentazione rinforzata iso-durata

Anche in questo caso, la durata a fatica del bistrato rinforzato ( $N_r$ ) è stata calcolata moltiplicando la durata restituita dal metodo sudafricano ( $N_{MePADS}$ ), valida per i materiali non rinforzati soggetti a quel livello di sollecitazione (114.26  $\mu$ strain), per il coefficiente amplificativo  $K$  desunto dalle osservazioni di laboratorio:

$$N_u = (2332.2/114.26)^{1/0.203} = \mathbf{2.84E+06 \text{ (cb non rinforzato – legge di laboratorio)}} \quad (7)$$

$$N_r = (6999.7/114.26)^{1/0.243} = \mathbf{2.26E+07 \text{ (cb rinforzato – legge di laboratorio)}} \quad (8)$$

$$K = N_r/N_u = \mathbf{7.98 \text{ (fattore moltiplicativo vita a fatica bistrato rinforzato)}} \quad (9)$$

$$\mathbf{N_r = N_{MePADS} \times K = 5.21E+06 \times 7.98 = 4.16E+07} \quad (10)$$

## Conclusioni

Il presente studio sperimentale si è concentrato sulla valutazione del contributo prestazionale conseguibile attraverso l'utilizzo di uno specifico materiale composito per applicazioni stradali (in particolare per risanamenti e riabilitazioni di pavimentazioni bituminose). Tale rinforzo è realizzato combinando una speciale membrana bituminosa con una griglia in fibra di vetro; ciò al fine di coniugarne i rispettivi benefici in termini prestazionali (principalmente, rilassamento degli sforzi e assorbimento di stati tenso-deformativi di trazione). Difatti, alla membrana bituminosa è affidata sia la funzione di SAMI (*Stress Absorbing Membrane Interlayer*), la quale consente di inibire in maniera significativa il fenomeno di riflessione delle fessure e la fessurazione termica, che quella impermeabilizzante, al fine di proteggere gli strati sottostanti da infiltrazione di acqua e quelli sovrastanti dal fenomeno del "pumping" (risalita di acqua e materiale fino causata dal "pompaggio" dovuto al passaggio dei carichi veicolari). Da parte sua, invece, la griglia di rinforzo annegata all'interno della membrana contribuisce all'assorbimento delle tensioni e deformazioni indotte all'interno della pavimentazione a causa dei carichi veicolari ed ambientali mitigando lo stato tenso-deformativo a carico dei singoli strati che compongono la sovrastruttura con conseguente innalzamento della vita utile della pavimentazione stessa.

In particolare, l'obiettivo generale del presente studio è consistito nella valutazione sperimentale delle prestazioni a fatica di sistemi bituminosi rinforzati con il suddetto materiale composito. A tal fine, il programma di ricerca in laboratorio ha previsto l'esecuzione di prove dinamiche di flessione su 4 punti (4PB) con l'intento di individuare il livello delle prestazioni del sistema rinforzato nei confronti dei carichi ciclici. Le prove dinamiche flessionali su campioni prismatici ricavati da lastre preparate con Roller Compactor hanno consentito inoltre di ricavare utili informazioni riguardanti la rigidità dei sistemi bituminosi bistrato (rinforzato e non rinforzato) oggetto di studio.

I risultati sperimentali emersi a seguito delle prove flessionali volte alla determinazione della rigidità dei sistemi bituminosi bistrato hanno evidenziato con chiarezza che l'inserimento di un sistema di rinforzo all'interfaccia determina una discreta riduzione della rigidità complessiva del sistema (quantificabile in circa il 35-40% in funzione della frequenza di prova), a conferma del fatto che l'utilizzo di un sistema di rinforzo debba essere volto principalmente al miglioramento della resistenza alla fessurazione piuttosto che all'incremento della rigidità della pavimentazione (quantomeno nella fase iniziale della vita utile in cui gli strati bituminosi risultano ancora integri). Tale riduzione di rigidità è da porre in correlazione con il minor grado di compartecipazione all'interfaccia fra gli strati bituminosi fra i quali viene interposto il rinforzo, il che determina un sistema "meno solidale" e quindi caratterizzato da rigidità inferiore. Tale peculiarità, come evidenziato nella seconda parte dello studio, deve essere opportunamente tenuta in conto nel dimensionamento di pavimentazioni rinforzate per la quali il sistema bistrato di conglomerato bituminoso rinforzato potrebbe essere schematizzato come un unico strato avente rigidità ridotta, ma caratterizzato anche da prestazioni a fatica decisamente superiori rispetto a quanto avviene per il corrispondente sistema rinforzato, come dimostrato dalle successive prove di fatica nella medesima configurazione.

Difatti, il sistema rinforzato, seppur caratterizzato da minore rigidità iniziale, ha mostrato un **notevole miglioramento delle prestazioni in termini di resistenza ai carichi dinamici**

**di tipo flessionale** (resistenza fino a 22 volte superiore nell'intervallo di sollecitazione investigato), rispetto alla configurazione non rinforzata di controllo. Ciò dimostra con chiarezza come il contributo del sistema di rinforzo sia principalmente volto ad inibire la propagazione del danno (fessurazione) all'interno del materiale grazie alle spiccate doti di duttilità dimostrate, piuttosto che ad incrementare la rigidità della pavimentazione stessa.

Successivamente, alla luce delle suddette risultanze, si è cercato di evidenziare i possibili risvolti applicativi che potrebbero scaturire utilizzando i risultati raccolti in laboratorio. Nello specifico, è stato condotto un procedimento di dimensionamento comparativo di una pavimentazione stradale tipicamente realizzata in ambito nazionale nello svolgimento del quale la rigidità del sistema bituminoso bistrato rinforzato è stato opportunamente ridotto rispetto all'analogo sistema non rinforzato, in accordo con i risultati ottenuti nella fase preliminare delle prove 4PB discussi poc'anzi, e dove, al contempo, si sono utilizzati gli incrementi di vita utile a fatica desumibili dalle leggi di rottura per fatica ottenute in laboratorio per i sistemi bituminosi studiati.

Tale sviluppo teorico della ricerca ha evidenziato come, nonostante la minore rigidità assegnata al bistrato rinforzato, le pavimentazioni considerate (sia quella non rinforzata di riferimento che la corrispondente soluzione rinforzata) giungano comunque a rottura per effetto della rottura per fatica degli strati bituminosi piuttosto che per effetto di deformazioni eccessive degli strati non legati sottostanti. Tuttavia, sulla base delle evidenze di laboratorio e dei criteri alla base del metodo di calcolo utilizzato, è stata desunta una vita utile della pavimentazione rinforzata superiore del 400% rispetto a quella dell'analogo pavimentazione non rinforzata di riferimento il che equivarrebbe, in alternativa, alla possibile riduzione di 5 cm di conglomerato bituminoso per lo strato di base riuscendo comunque a garantire le medesime prestazioni a fatica. Tale riduzione implica significativi vantaggi tecnici, economici ed ambientali in quanto, non solo permetterebbe di **risparmiare più di un quintale di conglomerato bituminoso per ogni m<sup>2</sup> di stesa**, ma consentirebbe altresì di **realizzare lo strato di base con un'unica "passata"**, ovvero di stendere e compattare l'intero spessore in un'unica soluzione, invece delle 2 previste per la pavimentazione di riferimento.

In estrema sintesi è possibile, quindi, affermare che l'utilizzo del prodotto composito di rinforzo studiato è in grado di prolungare sensibilmente la vita a fatica del bistrato perché contribuisce ad assorbire le tensioni di trazione anche se, al contempo, tende a ridurre la rigidità globale del sistema. In ogni caso, le risultanze sperimentali e le successive conseguenti applicazioni teoriche osservate durante la ricerca condotta presso l'Università di Padova attestano inequivocabilmente i cospicui benefici prestazionali conseguibili attraverso un'opportuna applicazione del sistema di rinforzo AUTOTENE ASFALTICO ANTIPUMPING HE/TVP in termini di innalzamento della vita utile degli strati bituminosi all'interno dei quali venisse inserito. Non vanno, inoltre, sottaciute le potenzialità di pratica applicativa in termini tecnici ed economici garantite dal prodotto il quale è realizzato con una faccia inferiore autotermoadesiva che consente una adesione efficace alla superficie di conglomerato bituminoso sottostante (sia essa fresata o di nuova costruzione) agevolando sensibilmente le operazioni connesse alla costruzione ex-novo di pavimentazioni oppure alla realizzazione di interventi di risanamento su strade esistenti.

La ricerca in oggetto stimola numerose ipotesi di sviluppi ulteriori al fine di affinare le conoscenze preliminari emerse nell'ottica di conseguire una conoscenza sempre più

accurata e completa delle potenzialità applicative del prodotto, consentendo quindi l'elaborazione di linee guida affidabili per la progettazione delle pavimentazioni rinforzate con il rinforzo oggetto di indagine. In particolare, lo sviluppo di curve di fatica a differenti temperature e/o frequenze di prova consentirebbe di estendere l'applicabilità delle caratteristiche di rigidità e delle leggi di fatica a una più ampia casistica di condizioni ambientali e di traffico, rendendo possibile un calcolo maggiormente rigoroso delle pavimentazioni potendo tenere in considerazione, ad esempio, le variabilità stagionali del sito in oggetto. Lo studio del rinforzo di materiali bituminosi aventi caratteristiche meccaniche differenti (si pensi, in tal senso, ai conglomerati bituminosi realizzati con bitume modificato, sempre più impiegati in ambito stradale) avrebbe lo scopo di ottenere una casistica di curve di fatica maggiormente specifica da fornire al progettista impegnato nel calcolo razionale della sovrastruttura. Ulteriore aspetto da tenere in debita considerazione e non affrontato nel presente studio riguarda la resistenza a taglio dell'interfaccia in presenza del rinforzo, elemento spesso critico per l'accettazione delle lavorazioni e che sempre più spesso inizia a comparire nei capitolati speciali d'appalto. Uno studio specifico potrebbe essere volto a verificare le proprietà a taglio dell'interfaccia rinforzata in differenti condizioni climatiche e di traffico per, poi, cercare di dimostrare l'accettabilità di tali valori che potrebbero non soddisfare le limitazioni normalmente pensate e imposte in maniera empirica per le interfacce non rinforzate, ma che si potrebbe dimostrare essere del tutto compatibili con gli sforzi di taglio che effettivamente si sviluppano in quella specifica condizione. Il tutto, infine, potrebbe essere ottimizzato e calibrato attraverso studi più a lungo termine che siano volti al monitoraggio periodico delle condizioni di tronchi pilota specifici realizzati con o senza l'impiego del rinforzo oggetto della presente ricerca.