

POLITECNICO DI TORINO

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale



INDAGINI SPERIMENTALI SU PISTA CICLABILE

PREFABBRICATA ECOSOSTENIBILE:

il caso studio del progetto ECOSMARTROAD 2.0

Relatore:

Prof. Giuseppe CHIAPPINELLI

Candidato:

Paolo MONCALVO

INDICE

Abstract	1
1. Introduzione	2
2. Individuazione caratteristiche dell'opera	3
2.1 Soggetti coinvolti nel progetto.....	3
2.2 Descrizione del progetto	4
2.3 Inquadramento territoriale	7
2.4 La struttura della pista ciclabile.....	9
3. Materiali costituenti la pista ciclabile.....	10
3.1 Recupero delle pavimentazioni stradali.....	10
3.2 Applicazioni sostenibili per piste ciclabili.....	11
3.3 Fresato di recupero	13
3.4 Materiale plastico	20
3.4.1 Il problema della plastica	20
3.4.2 I polimeri.....	22
3.4.3 Il riciclo dei polimeri	27
3.4.4 I polimeri nelle costruzioni.....	28
4 Miscela Fresato-Polipropilene per la sovrastruttura delle piste ciclabili	29
4.1 Prove di laboratorio.....	29
4.2 Prove per la valutazione della rigidezza	37
4.3. Prove per la valutazione della resistenza a fatica	49
5. Schema strutturale del prototipo della pista ciclabile	55
5.1 Fondazione	55
5.2 Sovrastruttura prefabbricata	56
5.2.1 Compensato fenolico	57
5.2.2 Modulo prefabbricato (piastra e base d'appoggio).....	57
5.2.3 Trattamento superficiale	69
5.5 Sistema di sensoristica	72

6. Modellazione e relazione di calcolo della struttura della pista ciclabile	74
6.1 Descrizione del modello	74
6.2 Analisi dei carichi.....	80
6.3 Prove per la valutazione della resistenza meccanica a rottura	85
7. Conclusioni.....	96
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA	I
INDICE DELLE FIGURE.....	III
<i>ALLEGATO 1.....</i>	<i>IX</i>
<i>ALLEGATO 2.....</i>	<i>X</i>
<i>ALLEGATO 3.....</i>	<i>XXII</i>

Abstract

Questo lavoro di tesi vuole essere un reale contributo al progetto di ricerca ECOSMARTROAD 2.0, (finanziato con il contributo della Regione Piemonte), che intende realizzare una pista ciclabile prefabbricata, ridando nuova vita a materiali provenienti dalla raccolta differenziata dei rifiuti urbani e dalla demolizione delle pavimentazioni. Le diverse indagini effettuate nel presente lavoro di tesi hanno avuto come obiettivo la verifica della rispondenza delle caratteristiche costitutive della miscela impiegata per la realizzazione del modulo prefabbricato alle esigenze di resistenza meccanica, durabilità e sicurezza di guida in opera.

Dopo una breve descrizione iniziale del progetto, dei partners coinvolti e di alcune soluzioni innovative presenti in bibliografia, si è passati ad analizzare le proprietà dei materiali componenti e successivamente quelle della mescola di progetto costituita da Polipropilene e da fresato.

Il Polipropilene miscelato a freddo con il fresato e sciolto successivamente sembra essere la tecnica più idonea sia per la realizzazione dei provini di prova sia per la preparazione del pannello in vera grandezza. In tal modo, il fresato di recupero (detto RAP) passa dall'essere un materiale di scarto, che necessita anche di operazioni articolate di smaltimento, secondo la normativa specifica, a rivivere nuovamente come manto stradale di nuovo utilizzabile.

Sull'altro versante del problema, che è l'enorme accumulo di plastica degli ultimi anni, si sono analizzate le varie composizioni dei polimeri, cercando quella che avesse le caratteristiche fisico chimiche più corrispondenti ad una costruzione stradale, tenendo sempre presente il rispetto dell'ambiente.

Prima di procedere al posizionamento su strada, è stato necessario provvedere all'esecuzione di tutta una serie di prove di laboratorio, come quella di Modulo dinamico e a Fatica, per verificare se la miscela ottenuta sia in grado di resistere e durare nel tempo nelle condizioni in cui verrà posizionata.

In seguito ad una risposta positiva, e anche incoraggiante, dai test sui provini si è passati ad analizzare lo schema strutturale dell'opera, andando a descrivere i singoli elementi che la compongono e le loro peculiarità.

Composta nei vari strati la struttura, si è proceduto a una sua modellazione attraverso un software di calcolo, per verificare allo stato limite ultimo e d'esercizio, l'effettivo comportamento della struttura soggetta ai carichi previsti durante la sua vita utile. Sono state infine effettuate prove per la valutazione delle caratteristiche superficiali del pannello prefabbricato.

1. Introduzione

Mai come in questo tempo, i tre termini “sostenibile”, “rinnovabile” e “green” sono stati usati in maniera inopportuna tanto da essere sentiti come sinonimi o desinenze di altre parole, come ad esempio l’economia. Eppure, ultimamente si sente l’urgenza per tutto il pianeta che queste parole si trasformino in realtà concrete, tali da cambiare il nostro modo di pensare. Questo decennio e il prossimo sono l’ultima possibilità per garantire un futuro al nostro pianeta. Quindi, questa sarà una sfida cruciale che non può essere più disattesa.

In realtà, il termine “sostenibile”, ad esempio, significa, nella sua più piena accezione, “durevole nel tempo” e allora si comprende come la sfida più importante sia quella di un cambiamento di mentalità: bisogna passare da un modello lineare (bisogno, soluzione, consumo, rifiuto) ad un modello circolare (bisogno, soluzione, consumo, rifiuto, riutilizzo come risorsa).

Se pensiamo alla parola “plastica”, si apre davanti a noi uno scenario sconfinato: dagli anni ’50, la plastica è utilizzata universalmente per un’infinità di soluzioni e ha costituito un’importante risorsa, a costi decisamente contenuti. Le quantità di materiale plastico sono decisamente consistenti, basti pensare che solo nel nostro Paese ogni abitante impiega meno di una settimana a gettare un chilogrammo di rifiuti plastici e la produzione italiana si aggira a circa settanta chilogrammi pro capite, superando la cifra di quattrocento milioni di tonnellate annue.

Di fronte a queste cifre considerevoli, si capisce l’urgenza e la difficoltà di un così grande cambiamento di rotta, ormai, non più prorogabile.

Pensare al rifiuto come possibilità di un nuovo utilizzo non è semplice, perché prevede già a monte una progettazione intelligente che tenga conto di tutti i fattori in gioco.

Un tale obiettivo concretizza proprio quel cambiamento di mentalità che occorre intraprendere: infatti, riutilizzare non significa inventare forme creative d’arte ma rimettere a servizio della comunità ciò che ancora ha valore e non deve essere sprecato.

Questa tesi ha come obiettivo il progetto di una pista ciclabile, costruita utilizzando interamente materiali di recupero, fornendo così una soluzione innovativa a una problematica importante per ogni città.

L’abbinamento pista ciclabile-riutilizzo ha, inoltre, il merito di sensibilizzare i cittadini verso una convivenza che sia veramente rispettosa dell’ambiente. Infatti, oltre all’utilizzo dei rifiuti, incentivare l’uso dei veicoli non a motore porterà a una qualità migliore dell’aria, a un utilizzo consapevole delle risorse energetiche e a una diminuzione delle emissioni inquinanti.

Inoltre, alla base di questa progettazione intelligente si trova un fattore per nulla trascurabile: la possibilità di esportare e replicare questa struttura in vari contesti urbani.

Nel dettaglio, verranno analizzati diversi aspetti: prima di tutto, bisognerà analizzare la composizione e la struttura dei materiali individuati per la realizzazione dei blocchi prefabbricati; in secondo luogo, la modellazione e dimensionamento della struttura; infine, l'analisi strutturale e le verifiche seguendo la normativa vigente.

La composizione dei materiali per la struttura risulta la vera innovazione di questo progetto. Prima d'ora non si era mai utilizzato una miscela di polipropilene e fresato di recupero per ottenere una superficie adatta al traffico ciclopedonale. In letteratura, infatti, non è ancora stata trattata una tale miscela e, quindi, occorreranno diverse prove di laboratorio per testarne le caratteristiche meccaniche e fisiche.

Per ottenere un'opportuna modellazione si è studiata la struttura e i carichi previsti, al fine di analizzare lo stato tensionale e il comportamento generale dell'opera, mettendo già in essere la possibilità di creare un modulo semplice, facilmente replicabile, di facile posa e manutenzione. Definite le proprietà della nuova miscela innovativa e dimensionati i moduli prefabbricati, verrà fatto un confronto tra le sollecitazioni agenti e la capacità resistente della pista ciclabile così costruita per verificarne l'effettiva fattibilità.

2. Individuazione caratteristiche dell'opera

2.1 Soggetti coinvolti nel progetto

Un obiettivo di così grande portata ha bisogno della cooperazione di diversi soggetti, sia pubblici che privati. Gli enti locali devono assumersi l'onere principale, utilizzando tutte le risorse a cui possono attingere. La Regione Piemonte, sensibile a queste tematiche, ha creato la Piattaforma Tecnologica di Filiera (Pi.Te.F.) con lo scopo di valorizzare le filiere produttive locali, creare sinergie tra imprese che operano nello stesso settore e favorire lo sviluppo del territorio attraverso progetti e ricerche innovative e sostenibili. In tal senso, ha deliberato un bando denominato Progetto "ECOSMARTROAD 2.0", utilizzando fondi europei per lo sviluppo regionale, attraverso anche la partecipazione dello Stato italiano.

Trovati i fondi ed esaurite le pratiche burocratiche, la Regione ha individuato alcuni partner che potessero partecipare alla realizzazione pratica dell'opera. Tra i soggetti che hanno un ruolo di riferimento nei processi che porteranno alla nascita della pista ciclabile troviamo: la ditta Proplast, con sede ad Alessandria (AL), che avrà il compito di trovare e selezionare il materiale

plastico adatto; la ditta Nayl Composite Technology SRL, di Barone Canavese (TO), che avrà il compito di produrre il modulo prefabbricato composto dalla miscela plastica e fresato, utilizzando gli stampi forniti dalla Gallicchio Stampi SRL di Torino (TO); infine, la ditta SAM Costruzioni SRL, con sede a Cherasco (CN), avrà il ruolo del reperimento del materiale fresato e della messa in opera dei moduli prefabbricati.

A supporto dell'intero progetto trovano spazio il laboratorio Cismondi SRL, di Cuneo (CN), e il Politecnico di Torino per tutte le verifiche riguardante le caratteristiche del materiale innovativo utilizzato. Inoltre, per ultimare l'opera verranno aggiunti impianti di illuminazione e sensoristica avanzati, a cura della ditta Informatica System SRL, di Vicoforte (CN), e del Politecnico di Torino.

2.2 Descrizione del progetto

Due fattori, in parte concomitanti nei tempi, hanno sollecitato la popolazione all'acquisto di biciclette tradizionali o con pedalata assistita: il lockdown, dovuto alla pandemia di Covid-19 e l'introduzione di un Ecobonus a sostegno dell'acquisto.

Non è soltanto una moda passeggera ma è realmente un cambiamento di mentalità, basti pensare che il 30% degli spostamenti realizzati con l'automobile misura meno di 3 km, tragitti che possono essere coperti anche in bicicletta.

In virtù di questa nascente passione, anche l'Italia si avvicina agli altri paesi europei nel preferire una tipologia di trasporto non inquinante ed ecosostenibile.

PAESEI EUROPEI CHE UTILIZZANO LA BICI PER UN MAGGIOR NUMERO DI SPOSTAMENTI



Figura 1 - Grafico percentuali di utilizzatori bicicletta

Il 4% dell'Italia, mostrato dal grafico, sembra una percentuale irrisoria ma denota un significativo aumento della mobilità ciclo pedonale, che il nostro paese ignorava quasi del tutto, complice un assetto territoriale non totalmente pianeggiante e la mancanza di una sufficiente rete di piste ciclabili.

L'European Cyclist Federation (Ecf) stima che in tutta Europa, dopo il lockdown sia necessario implementare la rete ciclabile di 2300 km, dei quali 193 km in Italia. Parte di queste nuove realizzazioni sono già in fase di ultimazione, mentre altri tratti sono a progetto nelle principali province italiane.

A sostegno di questa spesa a cui devono far fronte le amministrazioni locali, la Comunità Europea ha deliberato il quadro finanziario pluriennale (QFP) che ha come scopo di favorire la ripresa economica puntando sul benessere dei cittadini attraverso gli obiettivi del Green Deal. Per questo motivo, la mobilità ecosostenibile riceverà un notevole contributo da parte della Comunità Europea.

Questa nuova forma di spostamento ha creato le cosiddette Greenway, letteralmente Vie Verdi. Una tale vision raccoglie l'idea di via, quindi spostamento, con l'idea di verde, ossia di natura. Questi percorsi valorizzano, quindi, sia il territorio che la popolazione che potrà trarre notevole giovamento dal percorrerle, scoprendo nuovi territori in modo meno vorticoso dello spostamento in auto.

Il progetto ECOSMARTROAD 2.0 prevede la realizzazione di blocchi prefabbricati in materiale misto tra plastica riciclata e materiale fresato per costruire un tratto di un innovativo sistema stradale per traffico ciclabile dotato di sensoristica avanzata, una stazione di rifornimento per E-Bike e un totem con una piattaforma digitale informativa per i turisti.

Questo prototipo ha lo scopo di realizzare un campo prova in cui testare l'efficienza dei blocchi prefabbricati, l'adattabilità con i sottoservizi presenti nel sito in esame e la facilità con cui si può intervenire in caso di sostituzione o riparazioni di alcuni componenti.

In questo modo, vengono a confluire due concezioni sempre più moderne: la Resource Efficiency e le tecnologie SMART, che sono imprescindibili per una crescita intelligente e sostenibile delle nostre città.

Inoltre, in tema di risparmio energetico, un tale modello risponde perfettamente al principio di SMART ROAD. Gli elementi di questo tratto stradale sono formati principalmente da rifiuti, che dopo un attento studio, si trasformano in MPS (Materie Prime Secondarie, *sostanze o materiali derivanti da cicli di recupero di rifiuti per i quali non siano necessari ulteriori trattamenti ai fini dell'utilizzazione in cicli industriali*) evitando il loro accumulo in discarica. Questo sistema di

riciclaggio risponde perfettamente al principio di circolarità, costituendo un prezioso vantaggio sia per l'ambiente che per l'economia, evitando l'eccessivo sfruttamento di materie prime.

La scelta di realizzare la struttura in blocchi prefabbricati favorisce la rapida messa in opera della stessa in cantiere, garantendo una maggiore precisione attraverso l'omogeneità dei singoli elementi.

Tali blocchi prefabbricati vengono progettati tenendo presente la necessità del passaggio di cavi e tubazioni sottostanti, prevedendo anche, un sistema di drenaggio dell'acqua piovana. Da ultimo, questi inglobano strumenti sofisticati per la diagnosi predittiva delle condizioni della struttura in tempo reale, così da permettere l'intervento tempestivo a risolvere varie problematiche, incidendo così sulla vita utile della struttura con costi contenuti.

In particolare, i sensori raccoglieranno dati sul traffico veicolare, sulla condizione dello strato di usura del manto stradale, le condizioni dei sottoservizi onde programmare tutti gli interventi atti a evitare lesioni impreviste e riparazioni costose.

Il progetto prevede anche una fase successiva riguardante lo sviluppo, con la stessa tecnologia, di aree di sosta o zone con traffico a bassa velocità nei centri abitati, avviando così la creazione delle cosiddette SMART CITY. La mobilità, insieme al lavoro, all'economia e alla comunicazione, svolge un ruolo di primissimo piano nella trasformazione delle nostre città, rendendole luoghi di un più largo e accessibile benessere.

Il progetto ECOSMARTROAD 2.0 assume in pieno queste nuove istanze, gestendo in modo razionale il sempre più caotico traffico cittadino. Una corretta gestione del trasporto consente di ottenere l'ottimizzazione negli spostamenti, dirottando in forme intelligenti i flussi veicolari differenziandoli in diverse modalità, monitorando sempre le emissioni di CO₂ e i volumi di traffico nelle diverse fasce orarie della giornata.

Un ultimo aspetto, non meno importante, riguarda la creazione di una nuova filiera produttiva che utilizza tecnologie non ancora commercializzate, aprendo così una nuova frontiera nel settore dei trasporti.

A fondamento di un tale ambizioso progetto, però, occorre una viva collaborazione tra i soggetti responsabili e, successivamente, da tutti gli utilizzatori divisi per ogni ambito.

2.3 Inquadramento territoriale

Il sito per l'installazione del prototipo di pista ciclabile è stato individuato nel comune di Alba (CN), in Corso Europa a partire dall'angolo con la Via Aldo Moro. Questa scelta è stata suggerita dall'Amministrazione Comunale, in quanto è un punto di grande passaggio, sia di veicoli, sia di velocipedi e sia di pedoni. È già presente una pista ciclabile, recentemente restaurata, nella zona adiacente a quella scelta, cosicché il tratto che ci riguarda costituisce un notevole miglioramento che permette un afflusso maggiore di traffico ciclistico.

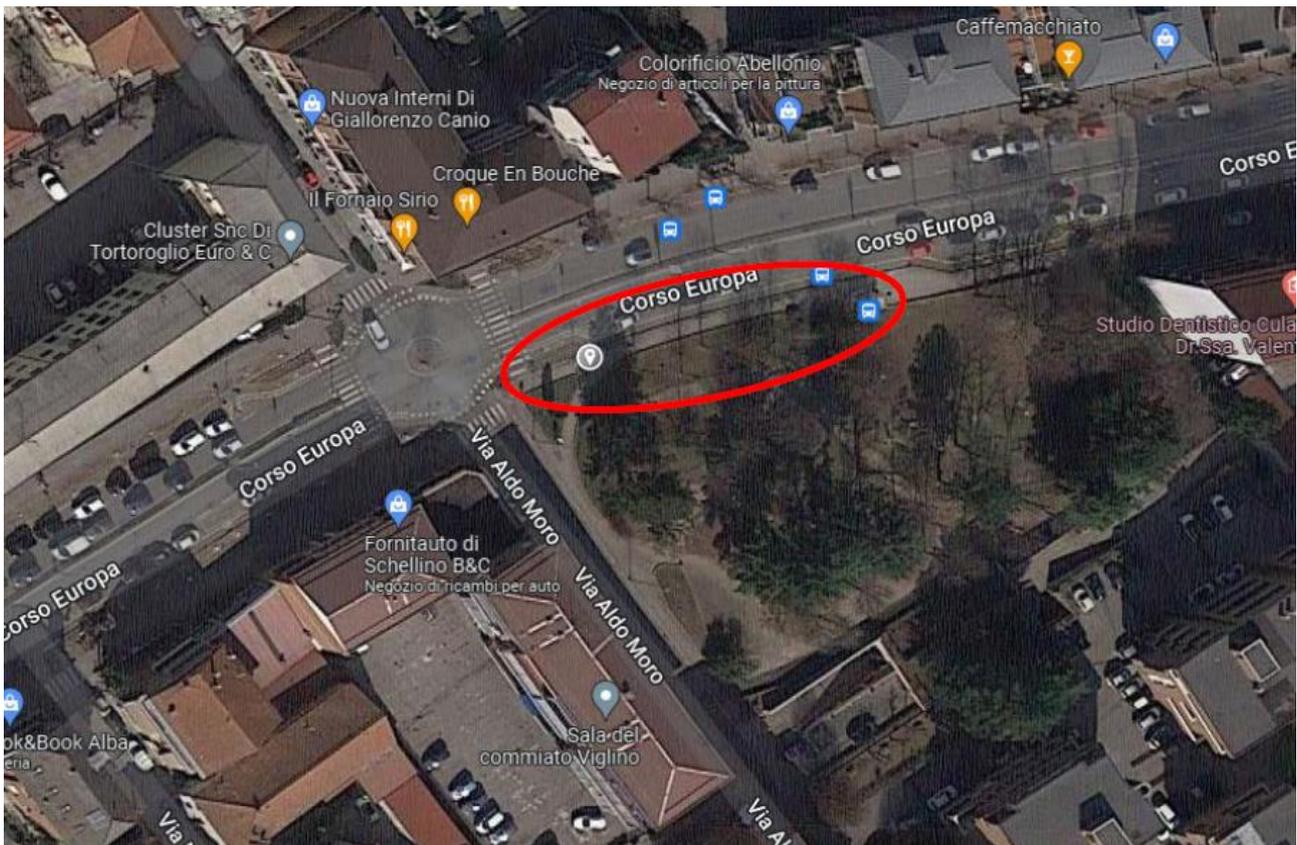


Figura 2 - Planimetria sito

Al momento il sito è riservato al passaggio pedonale e divide la carreggiata stradale da una zona verde costituita da un insieme di aiuole che anticipano un tratto boschivo.

Nel progetto, la zona pedonale sarà sede della nuova pista ciclabile, formata da blocchi prefabbricati, mentre l'aiuola verde di maggior superficie diverrà una zona dedicata alla sosta. È importante precisare che l'intera area d'interesse resterà sempre separata dalla strada vera e propria mediante l'utilizzo di una barriera, onde consentire il passaggio delle biciclette in totale sicurezza.



Figura 3 - Vista lato strada sito in esame

La scelta è stata anche dettata dal fatto che non sussistono interferenze tra la pista da realizzare ed eventuali fabbricati o opere architettoniche esistenti.

Inoltre, la sua superficie occupa una parte della sede stradale e quindi non costituisce un problema riguardante deviazione, espropri e vincoli specifici.

Resta da sottolineare, però, la presenza di un sistema fognario e di una linea dell'acquedotto, in quanto la zona è parte della cittadina di Alba e, come tale, è densamente abitata.

In fase di progetto, ci si è occupati di questa problematica ed è stata prevista una limitata profondità di scavo su cui posizionare la struttura in esame.

2.4 La struttura della pista ciclabile

Quando parliamo di piste ciclabili, non bisogna pensare ad un unico modello, ma le linee guida del DM del 30 novembre 1999, n.557 differenziano i percorsi ciclabili in tre tipologie:

- Pista ciclabile in sede propria, che può essere a senso unico o a doppio senso di circolazione, ed è totalmente separata dal traffico veicolare, il quale è interdetto dal percorrerla. Tale tipologia si suddivide in altre quattro sottospecie a seconda della vicinanza o meno del traffico motorizzato e dalla compresenza o meno di percorsi pedonali;
- Pista ciclabile su corsia riservata: si trova sulla carreggiata stradale ed è a un unico senso di marcia concorde con quello veicolare separata da esso mediante strisce longitudinali;
- Percorso promiscuo ciclabile e veicolare: riguarda itinerari ciclopedonali con un flusso di traffico molto ridotto a velocità contenuta.

Le linee guida definiscono anche la larghezza necessaria della corsia per la circolazione delle biciclette, andando a considerare bicicletta e ciclista. In tal senso avremo una larghezza minima di 0,9 m/ciclista e 1,5 m per consentire la pedalata affiancata o un sorpasso. Tale larghezza può essere ridotta a 1,25 m/corsia, nel caso di due corsie affiancate, per una larghezza totale di 2,5 m.

Il fondo stradale può essere realizzato con asfalto, calcestruzzo, mattonelle autobloccanti o, anche, terra battuta purché la superficie sia piana e sufficientemente liscia.

Tutto il tratto deve essere segnalato da un'apposita cartellonistica recante anche opportuni divieti e segnali d'attenzione.

Da ultimo, bisogna garantire alcuni servizi necessari all'afflusso di tanti ciclisti, come approvvigionamenti d'acqua, aree di ristoro, aree di sosta e servizi igienici.

Il progetto ECOSMARTROAD 2.0, non solo recepisce tutte le indicazioni ministeriali, ma rappresenta una vera avanguardia nella progettazione perché si pone come obiettivo principale la realizzazione veramente ecosostenibile di una strada a percorrenza ciclopedonale. È costituita da moduli prefabbricati composti da plastica e fresato bituminoso di recupero (RAP: "Reclaimed Asphalt Pavement").

La struttura è modulare, ottenuta assemblando una piastra di chiusura e una sella (o base di supporto). La piastra rappresenta il "pavimento", ossia la strada su cui passeranno le biciclette, mentre la sella è il supporto che conterrà un sistema di sensori ed eventuali sottoservizi.

L'innovazione si gioca a diversi livelli. Innanzitutto, il nuovo uso di materiali di secondo impiego che normalmente vanno ad accumularsi in discarica. In secondo luogo, grande novità

nella realizzazione di moduli prefabbricati, che aiutano a prevenire gli errori di messa in opera, riducendo i tempi di posizionamento e realizzando un modello facilmente replicabile ed esportabile anche in altri contesti. In terzo luogo, bisogna sottolineare il nuovo concetto di manutenzione che punta di più sulla prevenzione che non sulla riparazione dei danni causati dall'usura. Da ultimo, è innovativa tutta la sensoristica che sarà implementata sulla struttura, rendendola così un vero sistema intelligente.

3. Materiali costituenti la pista ciclabile

3.1 Recupero delle pavimentazioni stradali

Tutto il mondo si trova ad affrontare due sfide: il reperimento delle materie prime e lo smaltimento dei rifiuti prodotti, soprattutto, nelle grandi città. La risposta ad entrambi i problemi può essere solo il riutilizzo dei materiali di scarto come materia prima trasformata. In tal modo, la grande quantità di rifiuti garantisce una quantità sufficiente di materiale e il non accumulo in discarica rappresenta per l'ambiente un enorme vantaggio.

In particolare, il settore delle costruzioni è un grande consumatore di materie prime, come ad esempio legno, acciaio e sabbia, producendo grandi quantità di emissioni di CO₂ e riducendo notevolmente le risorse idriche.

Inoltre, anche i manufatti adoperati sono fonti di inquinamento e costituiscono una minaccia per un ambiente, ormai, già troppo compromesso.

Pertanto, occorre intraprendere un nuovo modo di costruire, sfruttando tutte le tecnologie che via via si vengono a formare. La ricerca, quindi, dovrà sostenere quel cambiamento di mentalità che porta ad un'economia circolare, piuttosto che lineare, in cui il materiale non più utilizzato trovi una nuova vita e rechi benessere all'intera società.

Bisogna passare da ciò che è un problema a ciò che è una risorsa. In questo passaggio cruciale per la nostra epoca, il ruolo dell'ingegnere è fondamentale: deve combinare la conoscenza, ottenuta dall'esperienza, nell'uso di materiali tradizionali, con il progresso tecnologico che produce nuovi materiali sempre più performanti.

3.2 Applicazioni sostenibili per piste ciclabili

La domanda di mobilità è sempre crescente e richiede un sempre minor tempo per raggiungere distanze via via sempre maggiori; quindi, la costruzione di nuove strade è un punto importante in ogni programmazione economica e progettuale delle città.

In quest'ottica, bisogna segnalare diversi tentativi di recupero di materiale di rifiuto nell'ambito della pavimentazione stradale con lo scopo di creare nuove strade a un costo minore e con una manutenzione programmata di più semplice attuazione.

Un primo tentativo di risposta a questi problemi è costituito da un particolare progetto realizzato in India, nei pressi di Nuova Delhi, dove si è costruito un tratto di strada ad alta percorrenza di circa un chilometro, utilizzando una nuova tipologia di conglomerato bituminoso. Lo scopo principale era quello di ridurre drasticamente la quantità di rifiuti plastici prodotta dagli abitanti della Capitale che, come si può pensare, raggiunge un quantitativo decisamente cospicuo.

Si è pensato di sostituire parte del bitume costituente la pavimentazione stradale con questo materiale di scarto. L'intera popolazione ha contribuito al reperimento di bottiglie, confezioni, sacchetti della spesa ed elementi in polistirolo per costituire un nuovo materiale composto da classici minerali, bitume e sostanze plastiche. Tutto il materiale raccolto è stato accuratamente ridotto fino a raggiungere una pezzatura adeguata, e poi scaldato fino a 170°C e pressato per ottenere un film sottile.

Dopodiché, sopra questo film viene colato il normale asfalto ottenendo così un composito nuovo, resistente e duraturo. Con questa tecnica, la plastica sostituisce circa il 10% del bitume, ottenendo altri diversi vantaggi, tra cui: un aumento della capacità di tenuta dell'asfalto al suolo, una riduzione nella formazione di crepe e problematiche relative all'ormaiamento e un miglior drenaggio dell'acqua.

Un importante studio ha riguardato la realizzazione di un additivo per evitare la dispersione delle microplastiche, che si andrebbero a formare dopo il passaggio di una grande quantità di traffico.

In Europa, la tradizionale vocazione ciclistica olandese ha portato alla prima pista ciclabile in plastica riciclata: la "PlasticRoad", inaugurata nel settembre 2018 a Zwolle.



Figura 4 - Modello Plastic Road

È un rivoluzionario progetto pilota che prevedeva la messa in opera di trenta metri di percorso ciclabile, mediante la posa di blocchi, costituiti per il 70% di plastica riciclata.

Oltre al vantaggio di smaltire i rifiuti in un modo smart, questi blocchi sono studiati per permettere il passaggio di sottoservizi, quali tubazioni e condotte, e il drenaggio dell'acqua. Questa forma consente una realizzazione della pavimentazione in tempi molto brevi, grazie alla leggerezza dei moduli e alla presenza di un sistema di incastro apposito.

Lungo tutto il percorso si trova un sistema sensoristico, capace di valutare l'andamento qualitativo della pavimentazione durante il suo utilizzo e il numero di passaggi, che, nel 2020, ha raggiunto la sorprendente quota di un milione.

Il continuo monitoraggio ha rivelato una qualità di questo prototipo costante nel tempo, anche a fronte di un traffico notevole.

Pertanto, anche altre amministrazioni locali hanno pensato di replicare "PlasticRoad" e costruire analoghe piste sul loro territorio. Si potrebbe citare il caso di Giethoorn, ma anche un comune italiano si è reso promotore di un'opera simile, Follonica in Toscana.

Il comune rivierasco ha deciso nel 2019 di riqualificare la zona dell'ex stabilimento Ilva in chiave green, deliberando come primo intervento la realizzazione di venti metri di pista ciclabile in plastica riciclata.

Pochi mesi dopo, vista la riuscita del primo tratto, il percorso è stato ampliato fino a 250 m e collega il ponte della Petraia alla scuola Arrigo Bugiani e alla Biblioteca della Ghisa.

La circolarità dei prodotti, non solo porta vantaggio al decoro urbano e alla funzionalità delle comunicazioni, ma porta anche a un ingente risparmio nelle emissioni di CO₂, basti pensare che ogni chilogrammo di plastica riciclata, porta a quota 28.500 chili di anidride carbonica risparmiata.

3.3 Fresato di recupero

Quando parliamo di una corretta gestione delle vie di comunicazione in un paese, dobbiamo tenere conto di molteplici fattori che a prima vista non sono evidenti. Prima di tutto bisogna sottolineare il grande aumento del flusso veicolare che ha come conseguenza il deterioramento repentino del manto stradale.

Secondo le rilevazioni governative, il traffico è in aumento del 5% annuo, solo nella nostra penisola.

Possiamo pensare, quindi, ad un aumento molto più ingente concentrato in alcune ore della giornata e in alcuni periodi dell'anno, che costituisce un grosso problema di viabilità, di sicurezza e di impatto ambientale.

In conseguenza di ciò, la manutenzione stradale gioca un ruolo di primo piano pur facendo i conti con risorse di materiali e budget economici sempre più limitati.

Inoltre, la produzione degli aggregati lapidei e del bitume, prodotti in grande quantità, porta ad un incremento dell'inquinamento che reca un grave danno all'ambiente.

Pertanto, tutti gli sforzi sono indirizzati a creare strade che siano più ecosostenibili, sia nella costruzione che nella manutenzione.

In quest'ottica va a porsi anche un altro obiettivo, eliminare dalle discariche la grande quantità di materiale fresato e scarificato durante le fasi di smaltimento o manutenzione dei tratti stradali. Occorre, anche, evidenziare che questa tipologia di rifiuto è definita "speciale" e quindi va smaltita, secondo il D.L. 152/2006, con notevoli costi per le ditte costruttrici.

Una brillante soluzione, capace di rispondere a queste problematiche in modo efficiente, è rappresentata dal reimpiego del conglomerato bituminoso fresato e rielaborato (RAP).

Il RAP è definito come "conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura", che solitamente viene reimpiegato come materiale costituente le miscele bituminose prodotte in impianto "a caldo" o "a freddo", secondo la norma UNI EN 13108-8. In essa sono anche contenuti i parametri per la classificazione, i controlli da effettuare per evidenziare eventuali

impurità, la frequenza di esecuzione delle prove, la distribuzione granulometrica e il contenuto di legante presente.

Diverse sono le normative alle quali deve attenersi il RAP per poter essere riutilizzato dopo gli opportuni trattamenti.

Innanzitutto, il decreto ministeriale dell'ambiente n°69, datato 28 marzo 2018, in vigore dal 3 luglio dello stesso anno, secondo il quale il conglomerato bituminoso fresato cessa di essere considerato rifiuto sotto opportune caratteristiche.

I criteri da soddisfare sono:

- Rispondere agli standard delle norme UNI EN 13108-8 o UNI EN 13242;
- Contenere un quantitativo di elementi estranei pericolosi come IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e amianto, entro i limiti riportati in tabella

	Parametro	U.M.	Limite massimo di concentrazione ammissibile
1	Sommatoria IPA	mg/kg	100
2	Amianto	mg/kg	1000 (*)

(*) Corrispondente al limite di rilevabilità della tecnica analitica (diffrazione a raggi X oppure I.R. - trasformata di Fourier). In ogni caso dovrà utilizzarsi la metodologia ufficialmente riconosciuta per tutto il territorio nazionale che consenta di rilevare valori di concentrazione inferiori.

Tabella 1 - Quantitativo limite elementi pericolosi

- Verificare la concentrazione massima di altri elementi particolari

	Parametro	U.M.	Limite massimo di concentrazione ammissibile
1	Nitrati	mg/l NO ₃	50
2	Fluoruri	mg/l F	1.5
3	Solfati	mg/l SO ₄	250
4	Cloruri	mg/l Cl	100
5	Cianuri	µg/l Cn	50
6	Bario	mg/l Ba	1
7	Rame	mg/l Cu	0.05
8	Zinco	mg/l Zn	3
9	Berillio	µg/l Be	10
10	Cobalto	µg/l Co	250
11	Nichel	µg/l Ni	10
12	Vanadio	µg/l V	250
13	Arsenico	µg/l As	50
14	Cadmio	µg/l Cd	5
15	Cromo totale	µg/l Cr	50
16	Piombo	µg/l Pb	50
17	Selenio	µg/l Se	10
18	Mercurio	µg/l Hg	1
19	COD	mg/l	30

Tabella 2 - Limiti di concentrazione di elementi estranei

Il produttore dovrà attestare la veridicità della bontà del campione ed emettere la dichiarazione di conformità a disposizione delle autorità di controllo.

Un altro testo che regola l'uso del RAP è contenuto nel UNI/TS 11688 e nella UNI EN 13108-8.

La prima fornisce i criteri di qualificazione e impiego del conglomerato bituminoso di recupero, proveniente da rimozione stradale mentre la seconda fornisce le specifiche del materiale.

L'insieme delle norme precedenti fa riferimento al Testo Unico Ambientale 152/06, che ha come obiettivo di migliorare le condizioni dell'ambiente e utilizzare in modo razionale le risorse per garantire un miglior benessere alle persone. Il riutilizzo dei rifiuti rientra in quest'ottica pienamente e viene incentivato in quanto soddisfa due tra i principali obiettivi: minor utilizzo delle materie prime e minor stoccaggio dei rifiuti in discarica.

Il riciclaggio nel settore stradale, del materiale di risulta, che costituisce un ingombrante rifiuto da stoccare in discarica, consiste nel recupero e riutilizzo del bitume invecchiato e dei detriti di conglomerato. Resta da evidenziare che, il RAP da solo non può essere riutilizzato, in quanto ha le stesse caratteristiche di un bitume invecchiato. Pertanto, occorre aggiungere leganti bituminosi o idraulici, che ripristinano l'originale coesione tra i grani e la capacità di sviluppare attrito interno, tra le particelle di conglomerato rivestite da bitume.

Sono diverse le grandezze che vengono osservate per classificare la qualità del RAP, tra le principali possiamo elencare: quantitativo di bitume, la costituzione chimica dell'aggregato, la pezzatura del fresato, la presenza di materiali estranei come il cemento e l'omogeneità.

Per ottemperare, in maniere efficiente, alla fase di demolizione del manto stradale usurato si fa uso di macchine appositamente congegnate, dette fresatrici, che, con un grande tamburo fresante, asportano lo strato di usura in modo rapido. Lo strato rimosso da queste macchine risulta con uno spessore adeguato ad essere nuovamente ripristinato in un momento successivo. Tutto il materiale di risulta viene convogliato, tramite nastri trasportatori, nei cassoni dei camion che lo trasportano all'impianto di riciclo.



Figura 5 - Macchina fresatrice

La raschiatura del manto stradale viene precedentemente codificata in spessore e nella dimensione prestabilita. Si può andare da qualche centimetro fino a 40 cm di profondità.

Inoltre, è possibile ottenere un lavoro molto particolareggiato migliorando anche le irregolarità del manto stradale dovuta a usura.

I metodi per effettuare l'operazione di fresatura si differenziano in due tipologie: a "caldo" o a "freddo", in base alla temperatura alla quale il macchinario lavora.

Per i dispositivi che lavorano a caldo, decisamente meno numerosi, l'operazione consiste nel rammollimento dello strato superficiale, mediante appositi sistemi riscaldanti. In questo modo si "sfoglia" il manto stradale, limitando la frantumazione degli aggregati. Per i macchinari che operano a freddo, l'operazione di scarifica avviene analogamente a quelli a caldo, ma, funzionando a temperatura ambiente, portano a un risparmio di tempo e di denaro nella raschiatura della pavimentazione.

La tecnologia che gli impianti adoperano per trattare il materiale che viene così recuperato si divide in due modalità, anch'essa a seconda dell'energia utilizzata: abbiamo un riciclaggio a freddo e uno a caldo.

Nella tecnica "a freddo" si aggiungono leganti bituminosi, additivi rigeneranti ed eventualmente, se necessita di una correzione alla dimensione dei grani, inerti di primo impiego, il tutto a temperatura ambiente. È evidente che questa metodologia riserva notevoli vantaggi.

Prima di tutto, il successo di questo metodo deriva dal grande risparmio economico, dovuto al completo riutilizzo del materiale fresato che viene riciclato completamente, ridiventando analogo a un materiale vergine. In secondo luogo, questo trattamento necessita di poca energia per la posa dell'intero manto stradale e questa bassa richiesta va ad impattare sia il conto economico sia il contesto ambientale.

La salvaguardia dell'ambiente è anche sostenuta dal non ricorso alle cave naturali, produttrici del materiale lapideo, il cui sfruttamento, oltre a deturpare il paesaggio, contribuisce a formazione di instabilità. Oltre ciò, il riutilizzo immediato del materiale demolito evita di occupare le discariche già ampiamente compromesse nel nostro territorio.

Anche il risparmio di tempo ha la sua importanza: prima di tutto a livello economico, perché accelera il processo di ripristino, limitando le ore-lavoro, e in secondo luogo, in tempi brevi, permette la ripresa del traffico e dei commerci.

A livello tecnico, la soluzione proposta con il RAP, risulta efficiente e funzionale, in quanto la superficie ottenuta è caratterizzata da uno spessore ottimale dello strato di usura ristabilito e le componenti granulometriche risultano legate molto bene tra di loro, così da creare una struttura omogenea.

Ripristinando soltanto lo strato superficiale, il sottofondo rimane intatto abbreviando così i tempi di ricostruzione della strada.

Non da ultimo, è importante osservare che l'operazione di ripristino non interferiscono eccessivamente con il traffico veicolare. Infatti, è possibile dividere la carreggiata in corsia di marcia e corsie di lavoro. Il treno di riciclaggio, con cui si effettuano le operazioni di stesura del materiale, occupa lo spazio limitato da una sola corsia. In questo modo, si rispetta la sicurezza di entrambi gli ambienti, quello di lavoro e quello veicolare, permettendo la normale circolazione.

È possibile realizzare un riciclaggio “a freddo” sia direttamente in cantiere sia in impianti appositi.

In situ, abbiamo il maggior vantaggio sia in termini di salvaguardia ambientale, sia in termini di risparmio di tempo e quindi di risorse economiche. L'affidabilità è garantita da appositi macchinari che miscelano il fresato con le emulsioni bituminose, stabilizzanti cementizi, acqua e, se previsto, aggregati lapidei.

È evidente, che questo metodo, garantisce in tempi brevi un buon prodotto che è facile da applicare, piuttosto compatto, così da evitare eccessive fessurazioni, rendendo la strada resistente all'usura e all'umidità.

Gli impianti per il riciclaggio a freddo possono essere permanenti oppure temporanei. La necessità di riposizionare il RAP trattato dipende dalla distanza del cantiere rispetto all'impianto. Gli impianti temporanei sono come succursali degli impianti fissi, posizionati in prossimità del cantiere stesso.

In entrambi i modi, il trattamento avviene in macchinari che permettono di regolare la miscelazione in modo preciso rispetto alle condizioni del fresato, cosicché si ottiene un prodotto dalle caratteristiche ottimali.

La tecnica “a caldo” differisce da quella a freddo, soltanto, per il fatto che l'aggregato lapideo deve essere riscaldato ad una temperatura adeguata alle sue caratteristiche. Come per il precedente, questa metodologia può essere sfruttata direttamente in situ oppure in impianto.

Per quanto riguarda la rigenerazione in cantiere, si usa il cosiddetto “treno di riciclaggio”, un insieme di macchinari specifici che, lavorando in serie e spostandosi lungo la carreggiata, compie tutte le funzioni che vanno dalla scarifica alla posa del nuovo strato.



Figura 6 - Treno di riciclaggio

Infatti, in testa al treno si trova la scarificatrice che può asportare fino a 5 o 6 cm lo strato superficiale. I macchinari seguenti si occupano di recuperare i detriti scarificati, amalgamarli con bitume nuovo e leganti. L'ultima vettura compatta il composto di nuova realizzazione, creando così una superficie compatta e liscia.

Questa pratica, nel tempo, ha rivelato un notevole impatto ambientale, aumentando le emissioni inquinanti e, anche se le prestazioni del tratto stradale ricostruito erano di notevole qualità, la procedura risulta grandemente energivora.

Ecco perché la produzione a caldo si preferisce realizzarla in impianti appositi.

In impianto, il processo è analogo a quello a freddo con una differenza sostanziale. Il RAP, prima di essere immesso nel processo produttivo viene asciugato e riscaldato, ottenendo una miscela che, essendo priva di acqua, favorisce il processo di coesione con i nuovi leganti. Oltre a ciò, il bitume vecchio riscaldato sviluppa fenomeni adesivi, contribuendo, in parte, all'attaccamento reciproco dei grani. In tal modo, si può risparmiare sulla componente vergine e riutilizzare appieno il bitume destinato alla discarica.

Un tale procedura, però, necessita di alcuni accorgimenti, a favore della sicurezza. Infatti, una simile produzione genera notevoli emissioni di gas nocivi per la salute e l'ambiente, dovute al riscaldamento del bitume. Bisogna quindi provvedere all'allentamento delle polveri e dei gas che si generano.

Ecco perché, si preferisce utilizzare impianti dedicati, invece, della produzione in sito, dove le condizioni sono più controllabili e gli operai più tutelati.

Un'ultima nota riguarda la tipologia di impianto che può essere continua o discontinua.

Nel continuo, si ha una produzione ininterrotta del RAP, mentre nel discontinuo abbiamo una produzione a richiesta. I vantaggi e gli svantaggi sono evidenti, perché nel primo caso avremo una produzione sempre disponibile in tempi brevi a scapito di un consumo costante di energia e risorse umane. Nel secondo abbiamo, un funzionamento puntuale che necessita però di tempi più lunghi per l'avvio della procedura.

La quantità di fresato che ogni anno, si ottiene raschiando le pavimentazioni stradali, raggiunge cifre veramente ragguardevoli. In Italia si producono circa 10 milioni di tonnellate che costituiscono quasi il 20% del materiale ottenuto dalle demolizioni strutturali. L'innovazione di questo progetto consiste anche in un nuovo uso di un tale rifiuto: esso viene recuperato dalle scarificatrici e poi, dopo un leggero trattamento di correzione o scarto delle impurità, viene miscelato con materiale plastico, in questo caso polipropilene.

3.4 Materiale plastico

3.4.1 Il problema della plastica

La storia della plastica comincia tra il 1861 e il 1862, quando Alexander Parkes brevetta la Parkesine derivata dal nitrato di cellulosa. Questo materiale rivela già la sua grande versatilità, trovando impiego per scatole, manici e perfino i colletti delle camicie.

Però, solo nel 1870, i fratelli Hyatt in America brevettano la celluloido, pensata per sostituire l'avorio per le palle da biliardo. Questo prodotto, però, aveva il difetto di essere molto infiammabile.

Il secolo che vede l'affermazione della plastica, in svariati ambiti, è proprio il 900, secolo in cui vengono inventate la Bakelite (1910), il polivinilcloruro (PVC)(1912) e il Cellophane (1913). Questi prodotti si affermano nella produzione di manufatti industriali, come ad esempio la produzione di autoveicoli.

Come sempre, l'impulso dato durante le guerre sviluppa la ricerca di materiali che possano sostituire beni naturali, difficilmente reperibili. Dunque, viene sintetizzato il nylon nel 1935, che

trova larghissimo uso, grazie alla riconquista dei territori da parte delle truppe americane; il Polietilene tereftalato (PET)(1941), che andrà a sostituire le fibre tessili naturali e gli imballaggi. Particolare rilievo, va dato alla nascita del Polietilene (1934), che viene sfruttato e implementato dalla scoperta di Giulio Natta nel 1954, con l'invenzione del Polipropilene isotattico che verrà commercializzato con marchio "Moplen".

La frontiera della plastica si estende sempre più, toccando il campo della moda, del design e dell'arte, diventando così simbolo di innovazione e modernità.

Oggi, la plastica è richiesta per applicazioni sempre più tecnologiche e, quindi, la ricerca trova sempre nuovi polimeri resistenti ad alte temperature e con durata di vita quasi infinita.

Queste caratteristiche di durabilità, economicità e leggerezza sono alla base del grande successo della plastica, però già contengono le problematiche gravi cui bisogna rispondere al più presto per non intasare il nostro pianeta con esso.

L'inquinamento della Terra è in costante aumento e si è stimato che occorrono pochi anni per raggiungere un punto di non ritorno, ossia, restando invariate le quantità di rifiuti prodotti, la mole di quest'ultimi supererà la quantità delle sostanze prodotte dalla Terra.

La plastica gioca un ruolo di primo piano in questo problema planetario, in quanto ha una vita quasi eterna ed è prodotta in quantità enormi in tutti i campi a causa del suo basso costo.

La Banca Mondiale ha stimato che entro il 2050, avremo in tutto il mondo, una crescita dei rifiuti doppia rispetto alla crescita della popolazione.

In Italia produciamo ben 6 milioni di tonnellate di plastica all'anno, con una quota pro capite di quasi 100 kg, classificando il nostro paese al secondo posto in Europa.

Bisogna dire, che anche i dati della raccolta differenziata registrano un discreto aumento ma, di fronte queste cifre, serve un cambiamento di rotta.

È innegabile che l'evoluzione auspicabile sarebbe nel proibire la produzione di plastica ma è difficile, al momento, trovare un sostituto tanto versatile quanto economico.

Di fronte a questo vero e proprio ultimatum che la Terra dà, bisogna escogitare nuove strategie per preservare le risorse di cibo necessarie per la sopravvivenza degli uomini. La plastica è anche una vera e propria calamità per tutti i mari, in quanto si deposita in finissime particelle, capaci di legarsi alle rocce, agli organismi viventi e ai vegetali, alterandone così la funzionalità.

L'ONU ha definito l'inquinamento da plastica come, in assoluto, il più pericoloso perché la quantità prodotta, in continuo aumento, è colossale: basti pensare che negli ultimi 60 anni, si è passati da 15 milioni di tonnellate a oltre 400 milioni.

Davanti a un tale problema, l'Unione Europea ha cercato di arginare il continuo degrado ambientale, emanando nel 2021 la "Single Use Plastic", la direttiva 2019/04, che vieta la

produzione di plastica monouso. È un primo passo per favorire la ricerca di materiali alternativi, ma la situazione presente non viene intaccata. Solo un serio riciclaggio del materiale plastico può essere una risposta adeguata a un funzionale recupero dell'ambiente, al servizio delle persone.

3.4.2 I polimeri

La plastica viene definita chimicamente con il termine “polimero”, che significa letteralmente “molte parti”. I costituenti, detti “monomeri”, formano lunghe catene unendosi in una macromolecola. Hanno un alto peso molecolare e possono essere sia di origine naturale, come la cellulosa o le proteine, ma possono essere prodotte anche sinteticamente e i diversi monomeri forniscono le caratteristiche macroscopiche e le proprietà chimico fisiche dei diversi polimeri.

I legami tra i monomeri definiscono la struttura e le proprietà del polimero e si possono riassumere in due tipologie: legami forti, covalenti all'interno della catena, e legami secondari, tra le catene.

In base alla tipologia dei legami, possiamo distinguere polimeri amorfi, cristallini e semicristallini. Quelli amorfi hanno una struttura non ordinata nello spazio. Quelli Cristallini, invece, presentano delle regioni ben ordinate in cui si formano cristalli lamellari. I semicristallini hanno zone amorfe all'esterno e zone cristalline lamellari all'interno.

Un'altra classificazione riguarda la resistenza al calore: troviamo polimeri termoplastici, termoindurenti ed elastomeri. I primi, in presenza di calore, rammolliscono e possono essere modellati in forme prestabilite. I termoindurenti hanno una struttura reticolata che ad alte temperature impedisce alle catene di separarsi. A differenza dei termoplastici, un aumento di temperatura provoca un indurimento e, arrivati al punto di fusione, bruciano. Per le proprietà fisiche, la capacità di resistenza dei termoindurenti, è notevolmente superiore a quella dei termoplastici, mentre questi ultimi mantengono una maggiore duttilità. Gli elastomeri hanno le proprietà chimico fisiche della gomma naturale e, quindi, lavorano in campo elastico, raggiungendo difficilmente il campo plastico. Durante la deformazione, le catene polimeriche passano da una dislocazione disordinata ad una orientazione pressoché rettilinea, lungo la direzione di allungamento.

Per quanto ci riguarda, è importante classificare questo tipo di materiale, secondo le specifiche proprietà meccaniche, e più precisamente la resistenza a trazione e la relativa deformazione. Si

definisce la tensione come il rapporto tra la forza che agisce sul materiale e la superficie su cui opera

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

e la deformazione come rapporto tra l'allungamento e la lunghezza originale, dopo l'avvenuta trazione

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

e si perviene alla definizione del loro rapporto, come

$$\sigma = E\varepsilon$$

dove E è il modulo di Young.

Si possono esaminare i vari tipi di polimeri e catalogare i loro comportamenti, rappresentando la relazione tensione-deformazione mediante curve nel piano cartesiano.

Si osserva che avremo tre tipologie di curve, a seconda della maggior o minor resistenza e duttilità.

In figura, si evidenziano tre comportamenti molto diversi tra di loro:

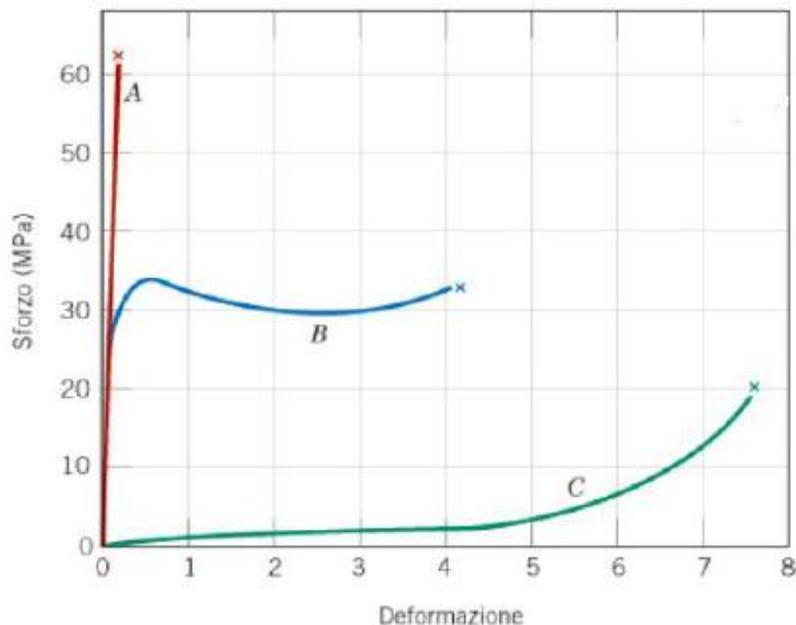


Tabella 3 - Diagramma sforzo-deformazione di tre polimeri diversi

Il tratto A definisce un polimero fragile, che ha un'elevata resistenza, bassa duttilità e bassa tenacità e arriva a rottura ancora in campo elastico. La tipologia B, invece, definisce un polimero plastico che ha una buona resistenza, una buona duttilità e una buona tenacità e dopo un primo

tratta elastico, raggiunge il carico di snervamento ed entra in campo plastico. Il tipo C possiede bassa resistenza, alta duttilità e bassa tenacità e raccoglie tutti i polimeri elastomerici.

Lo snervamento, ovvero il passaggio dal comportamento elastico a quello plastico, caratterizzato da uno sforzo di snervamento, avviene a temperatura ambiente per tutte le tipologie.

I grafici delle funzioni evidenziano, anche, una grandissima varietà del modulo elastico. Infatti, tale valore, rappresentato dalla tangente alla curva sforzo-deformazione, si trova all'interno di un intervallo molto ampio. Questa caratteristica dei materiali polimerici spiega l'ampia varietà degli stessi sia come composizione sia come comportamento meccanico. Si passa da un valore di 7 MPa, per i polimeri molto elastici, fino a raggiungere 4000 MPa, per quelli rigidi.

Anche i carichi di rottura, come si vede dal grafico, è molto diverso a seconda delle tipologie come pure l'allungamento che può raggiungere dieci volte la lunghezza iniziale, nei materiali duttili.

Come si può osservare dal grafico seguente, anche la Temperatura gioca un ruolo importante riguardante il carico di rottura e l'allungamento relativo:

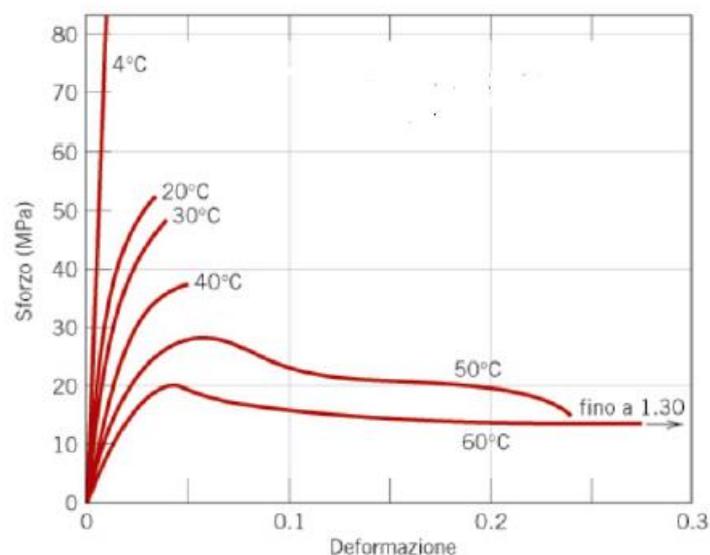


Tabella 4 - Influenza temperatura sul comportamento dei Polimeri

In generale, si osserva che all'aumento della temperatura, consegue una diminuzione del carico di rottura e un sempre maggior allungamento.

Un'altra proprietà di cui tener conto è la conducibilità termica: in alcuni polimeri l'incendio non si può propagare mentre altri si infiammano molto facilmente.

Altre proprietà fondamentali sono la dilatazione termica, la resistenza agli agenti chimici e atmosferici e la combustibilità, caratteristiche di cui tener conto soprattutto quando l'ambiente è molto variabile, sia come temperature che come condizioni meccaniche.

Come, si evince, da questo breve esame, le caratteristiche delle miscele plastiche non si possono paragonare con quelle dei normali materiali da costruzione, in quanto hanno un modulo di rigidità molto basso.

Tra l'infinita varietà di polimeri, un particolare accenno merita il polipropilene (PP) che deriva dal polietilene sostituendo un gruppo metilico ($-\text{CH}_3$) ad un atomo di idrogeno (H) in ogni monomero.

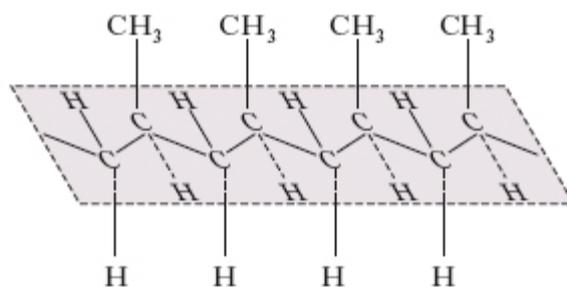


Figura 7 - Disposizione gruppo metilico

La sostituzione di un gruppo metilico può avvenire in diversi modi. Si possono ottenere due diverse configurazioni: in quella denominata "testa-testa" i gruppi si trovano legati ad atomi di carbonio (C) adiacenti, mentre in quella detta "testa-coda" il gruppo sostituito si sviluppa sempre nello stesso verso, alternato agli atomi di H (come in figura).

Nella realtà, la configurazione testa-testa è più ricorrente a motivo della repulsione polare tra i gruppi CH_3 e il loro volume nello spazio. Proprio per la presenza del gruppo metilico, si possono ottenere tre diverse configurazioni stereochimiche, in modo da classificare tre diverse tipologie di PP.

Nel PP isotattico, il gruppo si trova sempre dallo stesso lato della catena; in quello sindiotattico, il CH_3 si alterna rispetto alla catena, da una parte e dall'altra; infine, in quello denominato atattico, l'orientazione è casuale.

Per quanto già ricordato precedentemente, il PP isotattico è di gran lunga quello più usuale, anche perché presenta caratteristiche fisiche-meccaniche maggiormente performanti rispetto alle altre due conformazioni. Tali proprietà sono dovute alla capacità di impaccamento delle molecole che possono così costituire una maggiore cristallinità, mentre nelle altre due varianti prevale la caratteristica della gommosità.

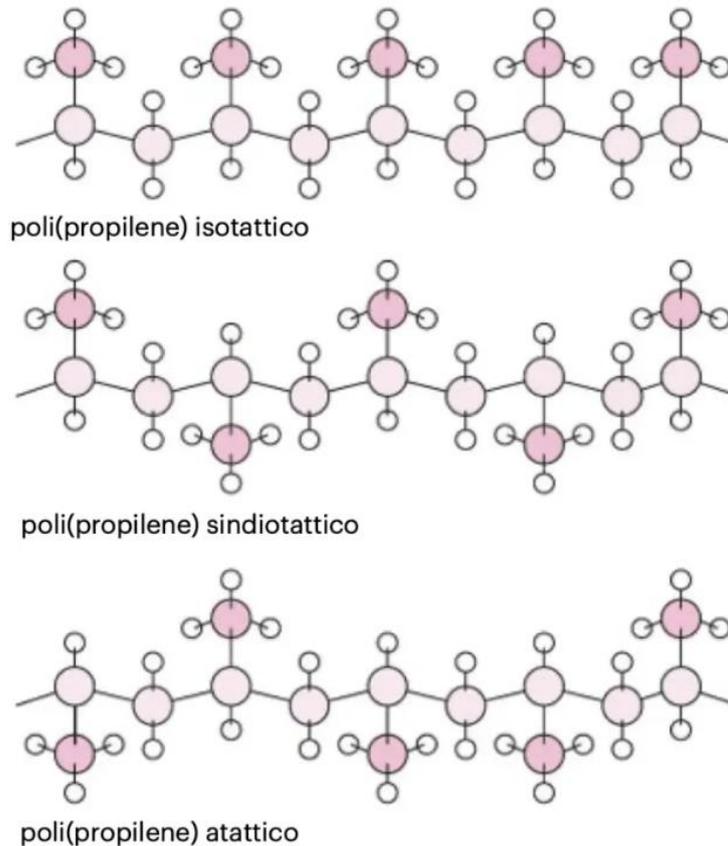


Figura 8 - Configurazioni stereochimiche

Tra le principali peculiarità, il polipropilene ha grande resistenza agli agenti chimici, è saldabile, può essere utilizzato tra le temperature tra i 0 °C e i 100 °C, mantenendosi inalterato in presenza di soluzioni acquose acide fino ad una temperatura di 120 °C.

Un'altra peculiarità importante è la sua facilità di lavorazione per le macchine utensili, che possono formattarlo in blocchi che successivamente verranno unite mediante saldatura.

Nonostante questa dote, si preferisce, per usi totalmente esterni, proteggere il polimero con degli additivi antiossidanti e stabilizzanti , come il nerofumo.

3.4.3 Il riciclo dei polimeri

La quantità di rifiuti plastici prodotti ogni anno è molto elevata e, se da una parte il loro reimpiego è una grande fonte di energia, la loro trasformazione può provocare ingenti danni all'ambiente.

Diverse sono le soluzioni proposte per questo problema che interessa l'intero pianeta.

La prima tecnica è quella del riciclo chimico, attraverso la quale, mediante processi chimici, si ottengono i monomeri costituenti. Il prodotto venutosi così a formare serve per sostituire comuni combustibili di origine fossile. In tal modo si ottiene una drastica riduzione di emissioni di CO₂ nell'atmosfera, contribuendo al miglioramento della qualità dell'aria, oltre al mantenimento delle fonti di energia non rinnovabili. Sono diversi i processi chimici impiegati: in particolare troviamo la decomposizione termica, la gassificazione e la idrogenazione.

La decomposizione termica consiste nella degradazione delle sostanze plastiche mediante calore. Se le temperature superano i 600 °C si parla di pirolisi, a temperature inferiori di cracking. La miscela, così ottenuta, è formata da diversi prodotti con basse concentrazioni di monomeri e, quindi, un materiale di bassa qualità ottimo per la combustione.

La gassificazione della plastica è una nuova tecnologia che può essere utilizzata per tutti i tipi di plastica. Consiste nell'immettere in un tamburo rotante i rifiuti e, lungo un reattore, aggiungere una miscela precisa di agenti ossidanti, come aria e ossigeno. Il prodotto ottenuto è il syngas, che può essere reimpiegato per avere energia elettrica oppure termica. In tal modo si ottiene energia a basso costo, possibilità di procedere anche in impianti piccoli e realizzare un ridotto impatto ambientale.

L'idrogenazione è una tecnica che porta alla rottura delle catene polimeriche, mediante l'utilizzo dell'idrogeno. Quello che si ottiene è un prodotto altamente saturo, che può essere utilizzato direttamente come combustibile. L'idrogeno, inoltre, favorisce la separazione delle plastiche da residui come lo zolfo, il cloro o l'azoto.

La seconda procedura di riciclo è quella meccanica. Essa consta di 6 fasi: la raccolta, la suddivisione per tipologia, la triturazione, il lavaggio, l'essiccazione e la macinazione.

Dopo aver raccolto il rifiuto plastico, esso viene selezionato ed eventualmente separato da corpi estranei, come carta o metalli. Successivamente, viene triturato in parti con la stessa pezzatura, al fine di garantire, un risultato omogeneo durante le fasi successive. Dopodiché un lavaggio assicurerà, il perfetto distacco di alcune parti estranee e un polimero pronto per essere macinato. Se il polimero è morbido, prima della macinazione, subirà un processo di essiccazione. Come ultimo step, abbiamo la macinazione atta a ridurre in polvere il materiale fin qui trattato.

A questo punto si ottiene un macinato che rispetta pienamente le caratteristiche del prodotto che è stato introdotto all'inizio della trasformazione che può essere reimpiegato per la creazione di nuovi oggetti.

Il terzo metodo di riciclo si basa sulla proprietà della plastica di essere un buon combustibile. Grandi forni bruciano plastica insieme ai rifiuti urbani, ottenendo energia termica dallo scambio termico tra i fumi caldi e vasche contenenti acqua. Il vapore acqueo prodotto viene convogliato e utilizzato per il riscaldamento domestico.

3.4.4 I polimeri nelle costruzioni

Tutta l'edilizia consuma una gran mole di materie prime in tutti i tipi di costruzioni. Si è pensato allora di sostituire parte di questi preziosi materiali con della plastica trattata opportunamente. Ad esempio, si sono aggiunte fibre di plastica al calcestruzzo ordinario, nella misura di 1% del volume.

Sono stati preparati dei campioni, sia di cls ordinario che quello rinforzato, e si è andato ad analizzare la conducibilità termica e la resistenza a compressione.

La prova sulla conducibilità termica è stata effettuata a una temperatura ambiente, di circa 20°C, e ha dimostrato come i campioni rinforzati con plastica hanno una sensibile riduzione, circa il 20%, rispetto al cls ordinario.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione, si è misurata la $f_{c,cube}$ dei due materiali e si è evidenziato una maggior resistenza del provino con all'interno fibre di plastica.

Un altro importante test è stato quello alla prima fessurazione: si sono preparati provini prismatici di dimensioni 150x150x600 mm dopo 28 giorni di maturazione, seguendo la normativa UNI 11039-1 e UNI 11039-2. È stato praticato un intaglio centrale a forma di V, largo 4 mm alla base e altezza 4 cm.

La prova è stata condotta a controllo di spostamento della apertura della fessura, fino a rottura. Le prove ripetute su provini contenenti polimeri diversi, ha mostrato un aumento della resistenza che va da un 3% fino al 41%, sempre rispetto a un calcestruzzo privo di elementi plastici.

In conclusione, emerge chiaramente che aggiungere materie polimeriche all'interno della matrice cementizia, apporta un risparmio del consumo delle materie prime e, quindi, anche economico, un miglioramento delle prestazioni meccaniche e termiche e, in generale, questa tecnica, risulta di gran lunga competitiva alle tradizionali tecniche costruttive.

4 Miscela Fresato-Polipropilene per la sovrastruttura delle piste ciclabili

4.1 Prove di laboratorio

Il carattere migliorativo che l'aggiunta di plastica ha portato nel calcestruzzo tradizionale ha sviluppato nei ricercatori l'idea di combinare plastica e altri materiali, tra i quali il conglomerato bituminoso di recupero, che rappresenta un rifiuto difficile da smaltire sia come quantità che come pericolosità.

Il miscela di conglomerato bituminoso di recupero (RAP) e materiale polimerico rappresenta una novità importante, in quanto il materiale plastico sostituisce completamente il legante bituminoso vergine. Di questo, rimane solo la percentuale derivata dal fresato proveniente dalla demolizione stradale.

Le prove, devono dunque accertare le caratteristiche meccaniche fisiche del nuovo mix, in quanto essendo novità assoluta non ha precedenti e, quindi, non è possibile consultare in letteratura i fattori di risposta alle varie sollecitazioni.

Inoltre, il materiale presenta un non omogeneità nella distribuzione dei componenti; quindi, anche questa specificità interroga il progettista sulla risposta e sul comportamento nel tempo.



Figura 9 - Sezione 1 Provino prismatico costituito da fresato (RAP) e Polipropilene (PP)



Figura 10 - Sezione 2 provino prismatico costituito da fresato (RAP) e Polipropilene (PP)

Prima di tutto, bisogna definire i parametri secondo cui svolgere le prove, poi bisogna utilizzare macchinari appropriati, definire l'ambito in cui svolgere le prove e raccogliere e analizzare i risultati ottenuti.

Per quanto riguarda la scelta dei parametri, si è ricorso alla normativa europea EN 12697-26:2018, per la definizione della procedura per verificare la rigidità del provino, e alla normativa EN 12697-24:2018, per valutare il comportamento a fatica. Questi regolamenti sono contenuti all'interno della EN 12697, emanata nel giugno del 2018, che regola tutti i metodi di prova dei conglomerati bituminosi.

Il luogo per eseguire le prove è il laboratorio del Politecnico di Torino, che ha messo a disposizione i propri macchinari e gli strumenti di analisi di tutti i risultati conseguiti.

I risultati raccolti vanno poi confrontati con quelli ottenuti, mediante le medesime prove, da un altro laboratorio indipendente, la ditta Cismondi S.r.l. di Cuneo.

I provini che abbiamo testato sono stati forniti, con tutte le specifiche richieste dalla normativa, dalla ditta Nayl Composite Technology SRL, di Barone Canavese (TO). Sono composti da fessato d'asfalto e Polipropilene ottenuto da lavorazioni di riciclaggio, nelle proporzioni di 40/60 % rispettivamente con un componente granulometrica delle dimensioni massime di 4 mm di diametro.

Si presenta sotto forma di trave prismatica di 39,4 cm di lunghezza, sezione trapezoidale, un volume pari a 0,63 m³, e una massa di 0.5353 kg. La densità media vale dunque 0.848 kg/ m³.

Il secondo provino per dimensioni e caratteristiche può essere paragonato al primo provino. Perciò, tutto ciò che riguarda la prova del primo, viene ripetuto anche per il secondo provino.

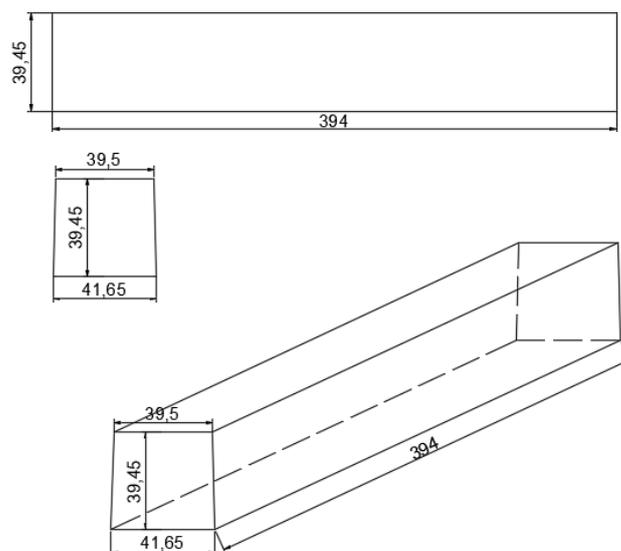


Figura 11 - Dimensioni Provino



Figura 12 - Vista dall'alto dei travetti prismatici



Figura 13 - Vista della parte inferiore dei travetti prismatici

Siccome i provini hanno uno spessore non congruente alla dimensione minima dei morsetti del macchinario in dotazione al Politecnico, è stato necessario posizionare degli spessori in ottone, per permettere il fissaggio del travetto all'interno dell'accessorio. Tale spessore, essendo di rigidità totalmente incomparabile a quella dei provini, non alterano i risultati finali.



Figura 14 - Spessori per garantire in fissaggio del provino per l'esecuzione della prova 4PB

Questo elemento metallico presenta delle dimensioni pari a 49x23x10 mm di spessore.



Figura 15 - Macchinario utilizzato al Politecnico di Torino per l'esecuzione delle prove



Figura 16 - Particolare 1, Bombola ad aria compressa

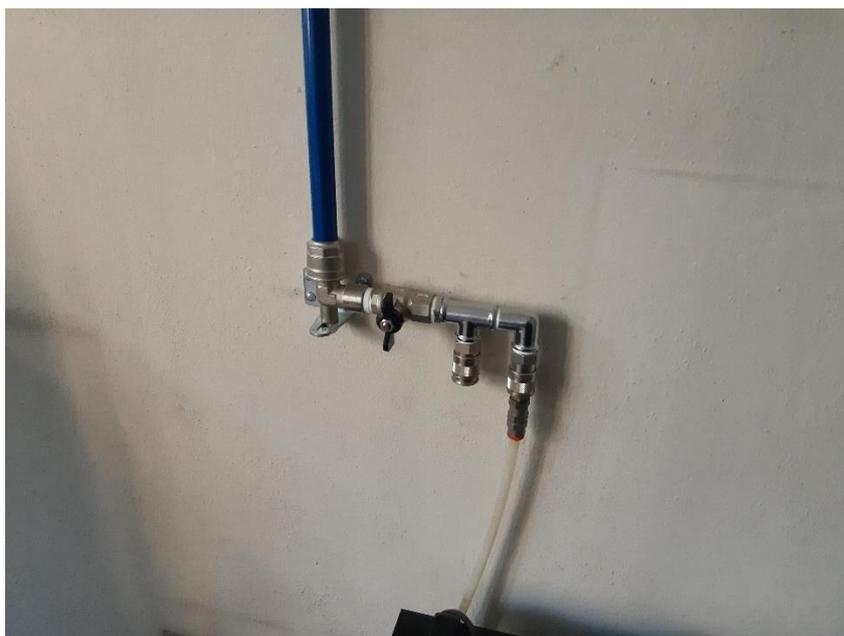


Figura 17 - Particolare 2, Valvola aria compressa



Figura 18 - Acquisitore dati



Figura 19 - Accessorio per Four Point Bending Test



Figura 20 - Posizionamento provino nella macchina

4.2 Prove per la valutazione della rigidità

La normativa EN-12697-26 specifica la procedura per testare la rigidità delle miscele bituminose, mediante diverse prove, eseguite su un materiale bituminoso compattato sottoposto a carico sinusoidale o altro carico controllato. La scelta di seguire una normativa inerente al materiale bituminoso, in assenza di una normativa specifica per la plastica, è avallata dal concetto di fondo di sostituire il bitume con la plastica e, quindi, il prodotto finale è pensato simile a quello del tradizionale manto stradale.

Seguendo la normativa, è possibile ricavare il modulo di rigidità, detto anche modulo complesso, definito dal rapporto tra la massima sollecitazione applicata e la conseguente deformazione:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

misurato in MPa.

La norma definisce un parametro, detto Modulo Complesso E^* , come la relazione tra sforzo e deformazione per un materiale viscoelastico lineare, sottoposto a un carico sinusoidale al tempo t , dove si applica una tensione $\sigma \cdot \sin(\omega t)$ che provoca una deformazione $\varepsilon \cdot \sin(\omega t - \Phi)$, dove Φ è l'angolo di fase rispetto alla sollecitazione.

$$E^* = |E^*| \cdot (\cos(\Phi) + i \cdot \sin(\Phi))$$

L'angolo di fase e l'ampiezza della deformazione dipendono dalla frequenza f e dalla temperatura T , e, quindi, anche il modulo complesso è funzione di queste due grandezze.

Esso è caratterizzato da due componenti: una parte reale e una parte immaginaria. La componente reale E_1 viene definita come:

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos(\Phi)$$

mentre la componente immaginaria E_2 come:

$$E_2 = |E^*| \cdot \sin(\Phi)$$

Con esse, possiamo ricavare il modulo complesso E^* e l'angolo di fase Φ :

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

Occorre sottolineare che, per materiali puramente elastici, Φ è uguale a 0. Quindi, il modulo complesso si riduce alla sola componente reale, ossia al modulo di Young. Per i materiali bituminosi accade a temperature molto basse, dove raggiungono il valore massimo.

I simboli utilizzati in questa trattazione sono:

D: dimensione massima degli aggregati nel provino, in millimetri (mm);

E: modulo elastico di rigidezza, in megapascal (MPa);

E*: modulo visco elastico complesso, in megapascal (MPa);

E1: parte reale del modulo complesso, in megapascal (MPa);

E2: parte immaginaria del modulo complesso, in megapascal (MPa);

F: forza di carico, in Newton (N);

h: lo spessore medio del provino, in millimetri (mm);

H: l'altezza del provino, in millimetri (mm);

l_0 : la lunghezza iniziale del provino, in millimetri (mm);

Δl : l'allungamento della tratto misurato, in micrometri (μm);

L: la luce tra due supporti nel prova a flessione, in millimetri (mm);

m: massa della parte mobile, in grammi (g);

M: peso del provino, in grammi (g);

t: il tempo di carico, in secondi (s);

ϑ : la temperatura del test, in gradi Celsius ($^{\circ}\text{C}$);

z: l'abbassamento, in millimetri (mm);

f: frequenza del test in Herz (Hz);

σ : lo stress applicato, in megapascal (MPa);

ε : la deformazione applicata, in micrometri per metro o microstrain (mm/m);

ε_{max} : la massima deformazione applicata al provino in esame, in micrometri su metri o microstrain;

φ : l'angolo di fase del materiale, in gradi ($^{\circ}$);

γ : il fattore di forma che è funzione della dimensione e della forma del provino, (1/mm o mm⁻¹);

μ : il fattore di massa, che è funzione della massa del provino e della massa della parte mobile che influenza la forza risultante per gli effetti di inerzia in grammi (g);

ν : il coefficiente di Poisson.

L'obiettivo della prova è calcolare i moduli di rigidezza, sottoponendo campioni opportunamente preparati a carichi ripetuti o a carichi a velocità di deformazione controllata, ricavando le sollecitazioni, le deformazioni e l'angolo di fase.

Innanzitutto, bisogna disporre di campioni idonei, sia come geometria sia come condizioni di temperatura e di maturazione. La normativa prevede che questi siano conservati su una superficie piana a una temperatura minore o uguale a 20 °C, per un periodo che va da 14 a 42 giorni dalla loro formazione.

Prima della prova, devono essere essiccati a massa costante in aria con un'umidità relativa inferiore all'80%, mantenendo la temperatura al disotto dei 20 °C.

Per quanto riguarda le dimensioni e la densità del campione, la normativa prevede che la densità apparente non deve discostarsi di oltre l'1% dalla densità media del lotto; perciò, il rapporto tra pieni e vuoti del campione deve essere sotto controllo.

L'apparecchiatura, in uso al Politecnico è stata controllata periodicamente con un provino di riferimento, detto Dummy, di cui si conoscono le proprietà. Facendo riferimento all'allegato B della norma in questione, si usa un campione di controllo con rigidezza compresa tra i 3 e i 14 GPa, applicato per ogni temperatura di prova. Inoltre, le dimensioni del provino di riferimento sono tali da contenere una massa paragonabile a quella di un campione d'asfalto e, anche, il fissaggio deve essere uguale a quello adottato per il materiale da testare.

Le condizioni per la scelta di carico si basano sui parametri di ampiezza, frequenza, carico e/o tempo e devono essere controllati tramite un feedback, basato sul controllo della deformazione o spostamento.

La relazione tra il tempo e l'ampiezza del carico deve generare un tipo di onda armonica. Eventuali discostamenti da una forma analoga possono evidenziare fenomeni di risonanza, che alterano la misura corretta.

Ovviamente l'ampiezza del carico non deve generare danni sul provino, per tutto il tempo della prova.

Bisogna prestare attenzione in questa fase a non causare danni da fatica al campione, soprattutto quando si testa il provino a temperature elevate. Pertanto, occorre ridurre al minimo il numero di cicli o il tempo di caricamento, eseguendo uno schema inverso dei livelli di sollecitazione per verificare di non aver causato alcun danno.

Per fornire una rappresentazione logaritmica delle isoterme, conviene utilizzare un ampio spettro delle frequenze ripetendo all'ultima misurazione la frequenza iniziale. Nelle prove effettuate si è scelta, infatti, una gamma di frequenze di 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e nuovamente 0,1 Hz. Il motivo di ripetere la prima frequenza risiede nel fatto

che se il risultato ottenuto all'ultima misurazione fornisce una differenza delle rigidità maggiore del 3%, si deve concludere che il provino ha subito un danno e, quindi, non può essere più utilizzato per la sperimentazione.

Anche sulla temperatura, la normativa detta delle linee guida. La preparazione del provino, prima di essere inserito nel macchinario per il test, prevede il mantenimento a riposo del campione per un periodo di almeno 4 ore, alla temperatura costante cui si vuole effettuare la prova. Per questo scopo, è stato inserito il provino in una cella climatica, per almeno 6 ore, in modo tale che l'intera massa raggiunga la temperatura desiderata. Questo processo è stato ripetuto per tutte le temperature richieste, ossia a 5 °C, 20 °C e 40 °C. La scelta di tali valori è rispettosa delle condizioni climatiche cui vorremmo sottoporre il nuovo materiale, al fine di simulare la realtà di una pista ciclabile.

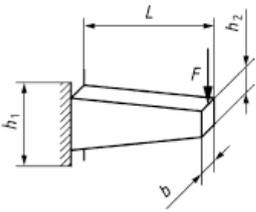
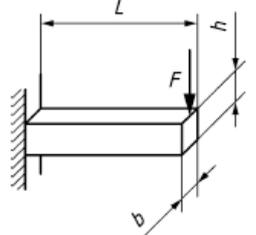
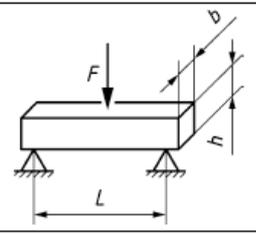
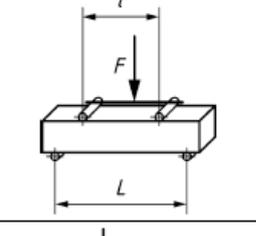
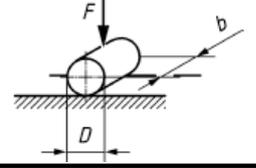
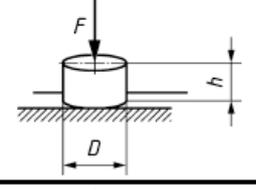
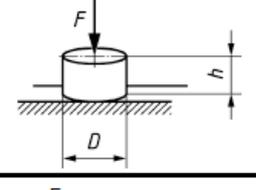
Le grandezze da misurare ad ogni prova sono la forza F applicata, in Newton, lo spostamento z , in millimetri, e l'angolo di fase φ .

Con esse è possibile calcolare le due componenti del modulo complesso mediante le formule:

$$E_1 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \cos(\varphi) + 10^{-6} \cdot \mu \cdot \omega^2 \right)$$

$$E_2 = \gamma \cdot \frac{F}{z} \cdot \sin(\varphi)$$

Dove i parametri γ e μ , che sono rispettivamente il fattore di forma e il fattore di massa, si ricavano in base al tipo di provino e alla condizione di carico, come riportato in tabella.

Type of loading		Form factor, γ mm ⁻¹	Mass factor, μ (g)
2PB-TR		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1}\right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	0,135 M + m
2PB-PR		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4} + m$
3PB-PR		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3} \approx \frac{L^3}{4bh^3}$	$\frac{M+m}{2}$
4PB-PR		$\frac{L^2 A}{bh^3} \left(\frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right) a$	$R(X) \left(\frac{M}{\pi^4} + \frac{m}{R(A)} \right) a$
IT-CY and CIT-CY		$\frac{1}{b} \cdot (\nu + 0,27)$	-
DTC-CY		$\frac{4h}{\pi D^2}$	$\frac{M}{2} + m$
DT-CY DT-PR		1	0

^a $R(X) = \frac{12L}{A} \cdot \left[\frac{1}{(3X/L - 3X^2/L^2 - A^2/L^2)} \right]$, $A = \frac{L-l}{2}$, X = coordinate at which the deflection is measured.

Tabella 5 - Configurazioni di carico in base al provino

In particolare, si è scelto, come test per misurare la rigidezza, la prova di flessione su quattro punti (4PB-PR) per provini prismatici.

La prova consiste nella applicazione in 4 punti di un carico armonico, che produce una flessione nel provino, lasciandolo libero di traslare lungo l'asse orizzontale e di ruotare. I punti estremi in cui il campione prismatico è fissato, non alterano la loro posizione verticale. Mentre, lo spostamento dei punti in cui è applicato il carico è simmetrico, sinusoidale e dipendente dal tempo.

In ogni istante, viene misurata la forza e la deformazione e, analogamente, lo sfasamento tra il segnale di forza e il segnale di spostamento, tutti in funzione del tempo.

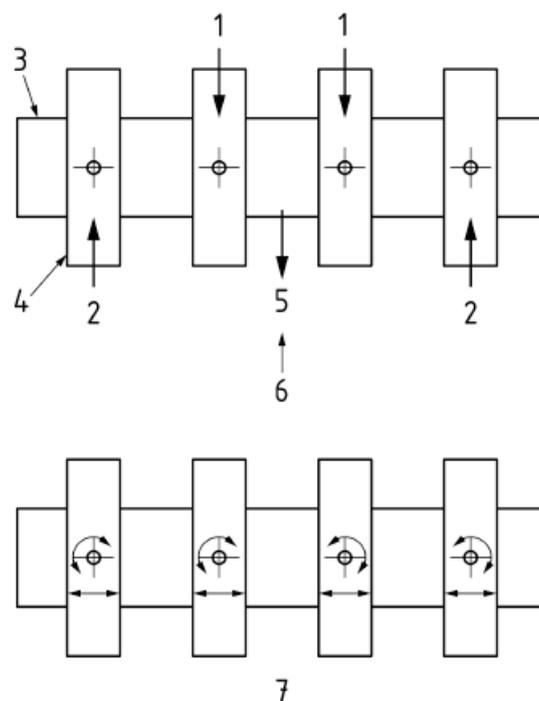


Figura 21 - Modello della prova

I punti numerati nelle figure, rappresentano i punti critici del campione. In particolare:

- Il numero 1 rappresenta il punto dove viene applicato il carico;
- Il numero 2 il punto di reazione;
- Il 3 indica la posizione del campione;
- Il 4 indica l'ubicazione della generica morsa, che blocca il provino;
- Il numero 5 e il numero 6 indicano la direzione della deflessione la direzione di ritorno;
- Il numero 7 indica, con opportuna simbologia, i movimenti che il provino è libero di compiere.

Il macchinario utilizzato è dotato di quattro morse per l'ancoraggio e il fissaggio del provino, nei punti indicati precedentemente. Nella prova di flessione su quattro punti, occorrono due martinetti, in grado di applicare la forza necessaria. È importante soffermarsi sulla posizione di questi due pistoni: uno posizionato ad una distanza A da un'estremità e l'altro ad una distanza L-A dalla stessa estremità.

Per una corretta analisi, la flessione tra due morsetti interni deve essere verificata, andando a misurare il rapporto tra lo spostamento centrale e lo spostamento nel punto a distanza A e tale rapporto deve rimanere costante.

$$\frac{Z(L/2)}{Z(A)} = \frac{R(A)}{R(L/2)} = \frac{3L^2 - 4A^2}{4A \times (3L - 4A)}$$

Il macchinario deve possedere una cella di carico di almeno 2000 N, per regolare il carico necessario, un trasduttore di spostamento che rileva gli spostamenti rispetto all'asse non perturbato e poi una apparecchiatura informatica per il trattamento dei dati.

Indispensabile è anche la camera termostatica per mantenere il provino a temperature costanti, durante l'intero ciclo di carico.

Seguendo la procedura dettata dalla normativa, si sono compiute le prove in contemporanea al laboratorio Cismondi, al fine di valutare il modulo di rigidezza di questo materiale non ancora codificato.

Al Politecnico si è testato il provino numero 3, mentre il laboratorio Cismondi si è occupato del provino 2 e 4.

Prima di procedere ad ogni test, si è provveduto a portare il macchinario e il provino stesso alla temperatura considerata. Per far questo il provino è stato conservato per tutto il tempo necessario in una cella climatica, portandolo alla stessa temperatura del macchinario e precisamente alle temperature di: 5°C, 20 °C e 40 °C.

Si è deciso di svolgere la prova a controllo di deformazione, applicando al test tre valori e precisamente: 50 µε, 100 µε e 150 µε.

La scelta è stata dettata dal futuro impiego di questo materiale che troverà ad operare a valori prossimi a questi selezionati. Analogamente il laboratorio indipendente ha condotto le prove nelle medesime condizioni.

Seguendo la normativa, si sono svolte diverse prove i cui risultati sono riportati nelle tabelle sottostanti. All'interno della tabella si possono osservare i valori medi del modulo di rigidezza, ottenuti come media dei valori calcolati alle varie frequenze.

T °C= 5			
	μΕ	μΕ	μΕ
n° Provino	50	100	150
2	2387	2332	2289
3	1771	1689	1656
4	2110	2063	2060
MEDIA	2089	2028	2002

Tabella 6 –Modulo E (deformazione, μs; a 5°C)*

T °C= 20			
	μΕ	μΕ	μΕ
n° Provino	50	100	150
2	1932	1850	1756
3	1774	1657	1627
4	1700	1585	1520
MEDIA	1802	1697	1634

Tabella 7 - Modulo E (deformazione, μs; a 20°C)*

T °C= 40			
	μΕ	μΕ	μΕ
n° Provino	50	100	150
2	1479	1310	1250
3	1407	1364	1330
4	1309	1175	1130
MEDIA	1398	1283	1237

Tabella 8 - Modulo E (deformazione, μs; a 40°C)*

Riportando i dati in un grafico che rappresenta il rapporto tra la deformazione applicata e la rigidità ottenuta, si osserva un andamento decrescente rispetto all'aumento di temperatura e all'incremento di deformazione, pur mantenendo valori compresi in un intervallo approssimato da 1300 MPa a 2100 MPa.

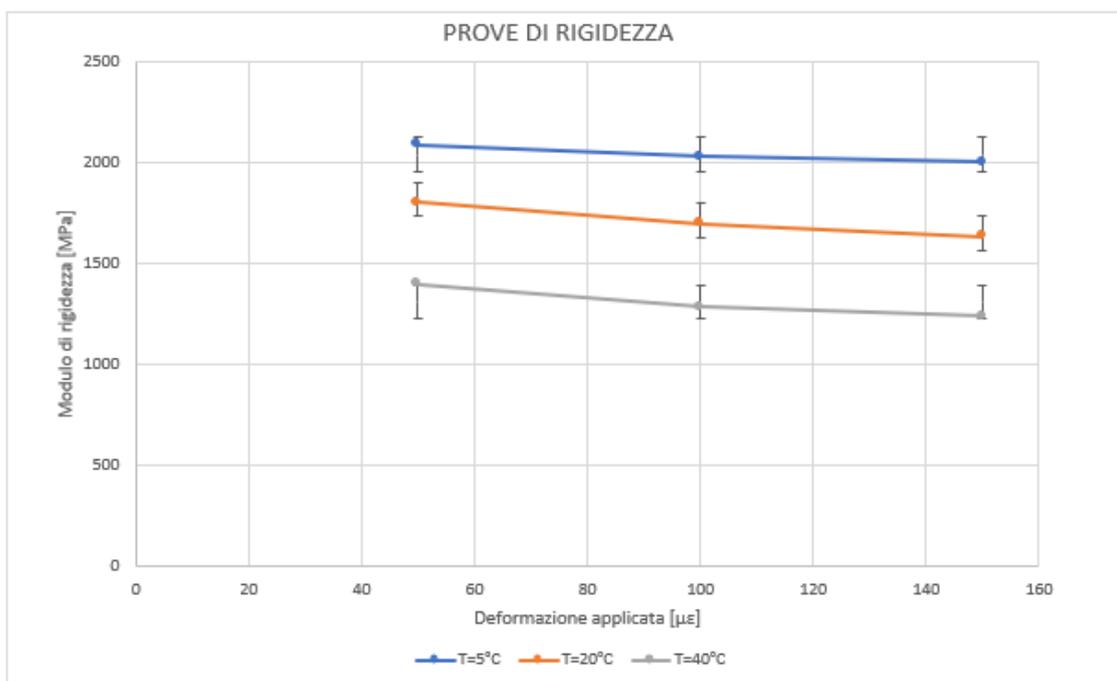


Tabella 9 - Andamento del Modulo E^* (deformazione, $\mu\epsilon$; $^{\circ}T$)

I grafici ottenuti riportano i valori medi di tutte le frequenze cui sono state eseguite le prove e da essi possiamo estrapolare i grafici relativi alle frequenze più vicine all'utilizzo futuro del modulo prefabbricato. Sono state scelte le frequenze di 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz e lo scopo era di osservare se la frequenza poteva incidere in maniera significativa sul risultato globale.

Si sono raccolti i risultati nelle seguenti tabelle:

T °C= 5			
	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
n° Provino	50	100	150
2	2460	2404	2349
3	1885	1767	1721
4	2143	2138	2121
MEDIA	2163	2103	2064

Tabella 10 - Modulo E^* (deformazione applicata, $\mu\epsilon$; a 5°C), a frequenze di esercizio della pista

T °C= 20			
	μΕ	μΕ	μΕ
n° Provino	50	100	150
2	1960	1918	1757
3	1983	1735	1672
4	1725	1609	1506
MEDIA	1889	1754	1645

Tabella 11 - Modulo E* (deformazione applicata, μs; a 20°C), a frequenze di esercizio della pista

T °C= 40			
	μΕ	μΕ	μΕ
n° Provino	50	100	150
2	1496	1297	1212
3	1551	1464	1400
4	1324	1125	1092
MEDIA	1457	1296	1234

Tabella 12 - Modulo E* (deformazione applicata, μs; a 40°C), a frequenze di esercizio della pista

Dai suddetti dati, si può diagrammare la relazione tra il modulo elastico e la deformazione applicata:

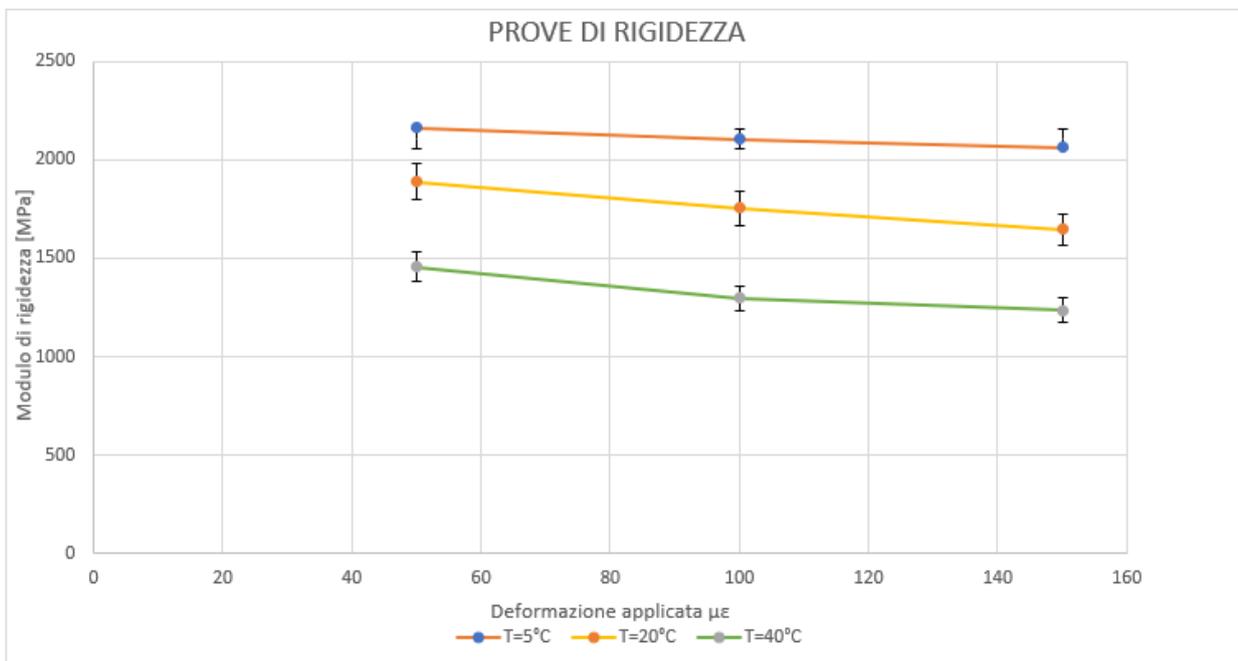


Figura 22 - Andamento del Modulo E* (deformazione applicata, μs; a 5,20, 40°C) a frequenze di esercizio della pista

I diagrammi e le tabelle mostrano che l'incidenza della frequenza è trascurabile sul comportamento del modulo elastico, infatti modifica tale valore per un massimo del 4%.

Un'altra grandezza che sembra influire sul valore del modulo complesso è la temperatura.

Perciò, si è valutato l'andamento del modulo di rigidezza al variare delle temperature di 5°C, 20°C, 40°C, mantenendo costante la deformazione imposta. In particolare, come è stato fatto in precedenza, si sono ricavati i valori di E^* alle varie temperature in esame, studiandone il valor medio per ogni frequenza.

Riportando i dati suddetti in un diagramma, fissata una deformazione, si ottengono curve pressoché lineari ad andamento decrescente:

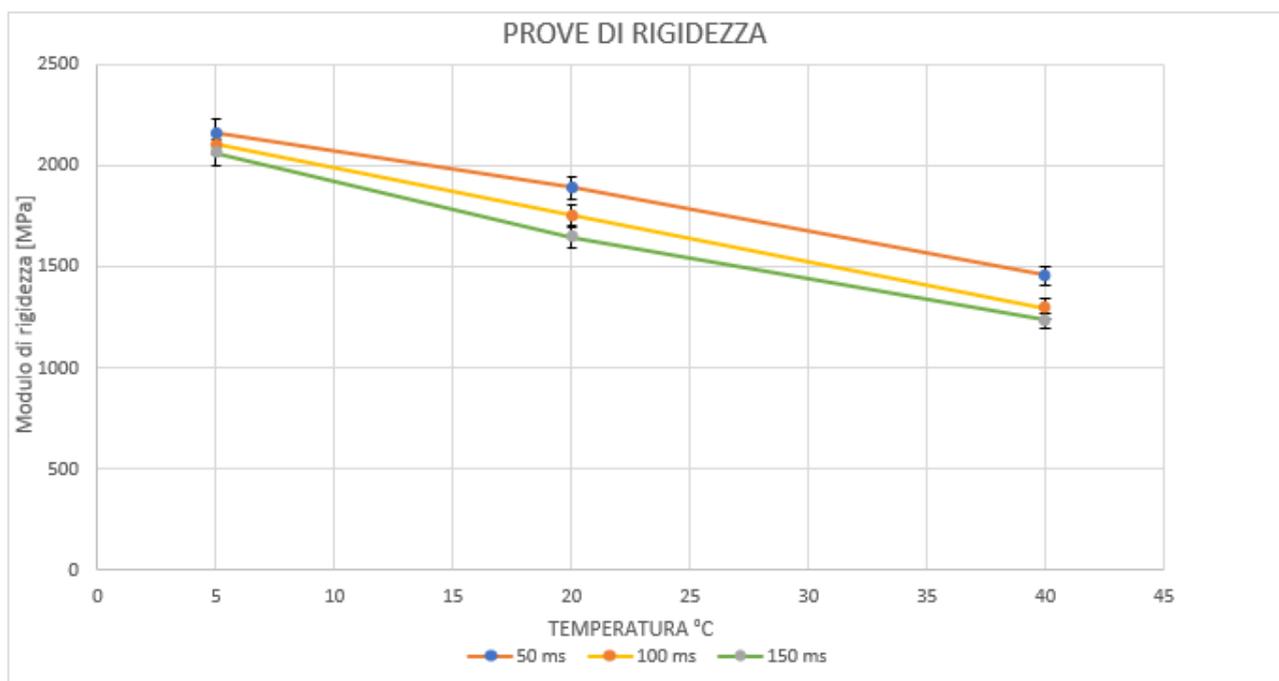


Figura 23 - Andamento del Modulo E^* (Temperatura, °C; a 50,100, 150 μ s) a frequenze di esercizio della pista

Come si può osservare dal grafico, al diminuire della deformazione, la curva tende ad abbassarsi, quasi traslando, verso il basso. Inoltre, si può evincere che tale abbassamento non è molto incisivo e il comportamento delle tre curve è analogo.

4.3. Prove per la valutazione della resistenza a fatica

Successivamente alle prove non distruttive per la valutazione della rigidezza, i provini sono stati sottoposti a prove per la valutazione della resistenza a fatica.. Anche per questo test si è fatto riferimento, in mancanza di una specifica sulle materie plastiche per le opere costruttive, alla normativa inerente alle miscele bituminose, anche perché il Polipropilene andrà a sostituire completamente il legante bituminoso.

In particolare, la normativa in esame è la EN 12697-24, la quale fornisce la precisa metodologia per classificare le miscele in base alla resistenza alla fatica, per prevedere il comportamento durante la vita utile della pista ciclabile.

Per fatica si intende la riduzione della resistenza di un materiale sottoposto a un gran numero di cicli di carico, rispetto a un singolo carico.

Sono diverse le prove cui sottoporre un campione opportuno, allo scopo di calcolare la resistenza a fatica ed è stata scelta la prova di flessione su quattro punti su provini di forma prismatica.

Durante l'intera prova, viene calcolato il modulo di rigidezza complesso S, come rapporto tra sollecitazione e deformazione per un materiale viscoelastico, sottoposto a un carico sinusoidale. Viene individuato come punto iniziale del modulo di rigidezza il valore di questo calcolato al centesimo ciclo di carico. Anche il valore dell'angolo di fase si computa al centesimo ciclo di carico.

La vita a fatica del campione è data dal numero di cicli corrispondenti ai criteri di fallimento scelti, considerando anche le condizioni di temperatura, modalità di caricamento e frequenza.

In base alla grandezza in gioco, è possibile calcolare il modulo di rigidezza complesso durante un ciclo, mediante la formula:

$$S_{\text{mix}} = \frac{12F_0 \cdot L^3}{Z(x_s) \cdot R(x_s) \cdot B \cdot H^3} \cdot \sqrt{1 + 2[\cos(\phi^*(x_s)) \cdot I(x_s) - \sin(\phi^*(x_s)) \cdot J(x_s)] + [I^2(x_s) + J^2(x_s)]}$$

Dove i simboli utilizzati dalla normativa rappresentano:

B è la larghezza del provino, in millimetri (mm);

D è la dimensione massima dei grani, in millimetri (mm);

H è l'altezza del provino, in millimetri (mm);

L è la lunghezza effettiva del provino, in millimetri (mm);

L_{tot} è la lunghezza totale del provino, in millimetri (mm);

F_0 è la forza verticale, in Newton (N);

I è l'inerzia del provino, in millimetri alla quarta (mm^4);

x_s è la posizione dove viene applicato il carico, in millimetri (mm);

Con questo metodo, il provino verrà fissato simmetricamente mediante due morsetti esterni e due morsetti interni. Il provino, di forma prismatica, viene fissato alla macchina e sottoposto a flessione in quattro punti con rotazioni e spostamenti longitudinali libere in ogni punto di carico e reazione.

La flessione viene prodotta concentrando la forza perpendicolarmente nei due morsetti interni. Durante la prova, bisogna misurare in funzione del tempo, la deflessione e il carico necessario per la flessione e lo sfasamento tra questi due segnali.

Durante tutta la durata del test, bisogna garantire atmosfera e temperatura controllata e necessita calcolare l'energia dissipata per ogni ciclo. Questa energia sarà composta da tre fattori: dissipazione d'energia di tipo viscosa a causa della flessione, perdita d'energia per i danni causati dalla fatica (micro o macro-lesioni) e perdite del sistema a causa degli smorzamenti.

La singola prova vede il posizionamento del provino secondo lo schema.

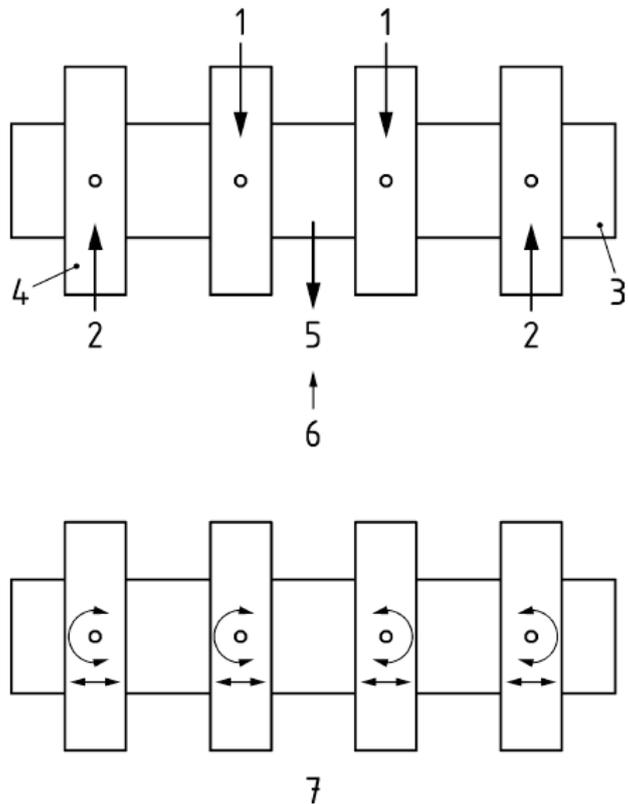


Figura 24 - Schema prova a fatica

I punti numerati nelle figure, rappresentano i punti critici che descrivono il campione, all'interno del macchinario. In particolare:

- Il numero 1 rappresenta il punto dove viene applicato il carico;
- Il numero 2 il punto di reazione;
- Il 3 indica la posizione del campione;
- Il 4 indica l'ubicazione della generica morsa, che blocca il provino;
- Il numero 5 e il numero 6 indicano la direzione della deflessione la direzione di ritorno;
- Il numero 7 indica, con opportuna simbologia, i movimenti che il provino è libero di compiere.

La prova verrà considerata conclusa quando il provino avrà subito 10^6 cicli di carico oppure quando il valore della sua rigidezza si sarà dimezzato.

L'attrezzatura necessaria per questa prova deve avere gli stessi requisiti del macchinario per la prova di rigidezza, descritta precedentemente con l'opportunità di essere programmata per compiere consecutivamente 10^6 cicli. Anche il software collegato deve essere in grado di funzionare correttamente per l'intera durata dell'esperimento.

L'intero macchinario deve essere a temperatura di 20 °C per tutta l'ora che precede l'immissione del campione e anche in provino, dopo l'inserimento nei morsetti, non deve subire alterazioni termiche per un tempo non inferiore ai 60 minuti.

Il provino verrà spostato da un carico sinusoidale alla frequenza scelta f e la prima misurazione verrà registrata dopo i primi 100 cicli e poi a intervalli regolari.

In aggiunta alla suddetta normativa, si è utilizzato anche la EN 13108-1 del 20176, che riguarda più precisamente le miscele bituminose e i conglomerati bituminosi. In particolare, contiene le specifiche per cui un conglomerato bituminoso può essere utilizzato nella costruzione di strade, aeroporti e ogni zona adibita al traffico.

Per quanto riguarda la prova a fatica, la normativa registra due tabelle per definire gli intervalli in cui devono rientrare i provini da testare.

Table 18 — Minimum resistance to fatigue, $\epsilon_{6\text{-min}}$

Minimum resistance to fatigue <i>microstrain</i>	Category $\epsilon_{6\text{-min}}$
310	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 310
260	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 260
220	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 220
190	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 190
160	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 160
130	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 130
115	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 115
100	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 100
90	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 90
80	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 80
70	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 70
60	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 60
50	$\epsilon_{6\text{-min}}$ 50
No requirement	$\epsilon_{6\text{-min}}$ NR

Tabella 13 - Prima classificazione a fatica

Table 19 — Resistance to fatigue, $N_{\text{macro min}}$

Minimum load cycle number until macro crack formation for $\Delta\varepsilon = 0,1 \text{ ‰}$	Minimum load cycle number until macro crack formation for $\Delta\varepsilon = 0,05 \text{ ‰}$	Category $N_{\text{macro min}}$
3 000	30 000	$N_{\text{macro min 3/30}}$
5 000	60 000	$N_{\text{macro min 5/60}}$
9 000	100 000	$N_{\text{macro min 9/100}}$
15 000	200 000	$N_{\text{macro min 15/200}}$
25 000	400 000	$N_{\text{macro min 25/400}}$
45 000	800 000	$N_{\text{macro min 45/800}}$
No requirement	No requirement	$N_{\text{macro min NR}}$

Tabella 14 - Seconda classificazione a fatica

In base a queste suddivisioni, possiamo classificare il provino come resistente dopo un milione di cicli (ordine di grandezza di 10^6) poiché in grado di resistere a una deformazione di $100 \mu\text{s}$ nelle prove effettuate. Ulteriore conferma della bontà del provino, è stata ottenuta dal laboratorio indipendente Cismondi che ha eseguito un'ulteriore prova con un controllo di deformazione a $100 \mu\text{s}$, rilevando che il provino resiste ad almeno un milione di cicli.

La seconda tabella divide i materiali in categorie osservando le fessure che si propagano nel provino durante la prova, misurando il numero di cicli di carico capaci di produrre tali aperture. Si è notato, nel nostro caso, che il provino non presenta macro-fratture dopo un milione di cicli di carico.

Nel caso in esame, la categoria di appartenenza del provino, secondo la Tabella 18 della normativa, è quella indicata come ε_{6-100} , che individua il materiale che almeno resiste a $100 \mu\text{s}$ dopo un milione di cicli.

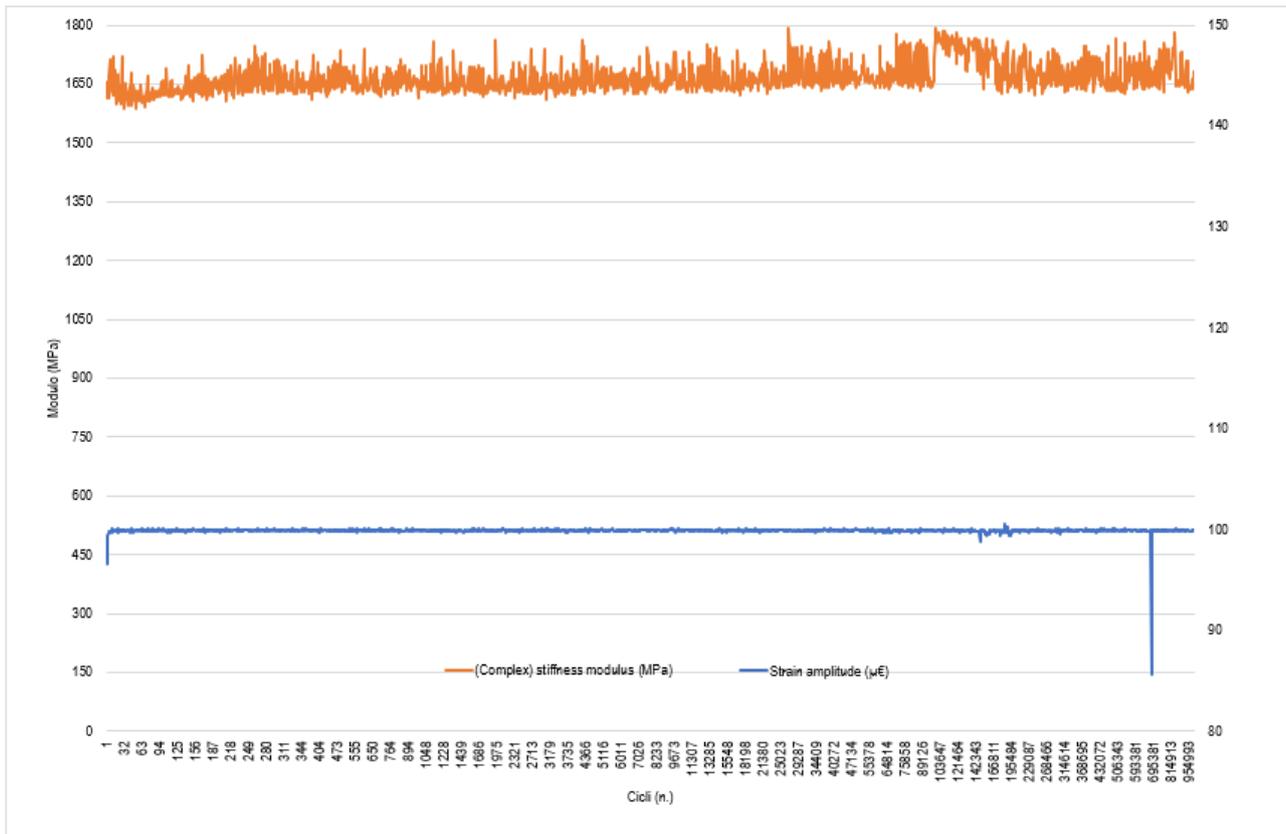


Figura 25 - Andamento del modulo all'aumentare del numero di cicli

Il grafico suddetto rappresenta, lungo i tre assi, il comportamento del modulo complesso durante la prova a fatica consistente in un milione di cicli. In particolare, sui tre assi troviamo il numero dei cicli sull'asse X, che va da zero a un milione, a destra la deformazione, calcolata in $\mu\epsilon$ e a sinistra il valore del modulo complesso, calcolato in MPa.

Mentre la deformazione resta costante lungo tutta la durata della prova, il modulo complesso assume valore interni all'intervallo 1600-1750 MPa, quindi, il modulo di rigidezza non presenta particolari variazioni durante il test.

5. Schema strutturale del prototipo della pista ciclabile

Una volta scelti i materiali da utilizzare, anche dopo le opportune prove di laboratorio, il progetto deve continuare definendo la struttura della pista ciclabile in accordo anche con il sito stabilito per il posizionamento.

La struttura di questo progetto innovativo è costituita dall'unione di diversi elementi.

Partendo dal terreno e salendo fino alla pavimentazione percorribile, possiamo evidenziare il magrone di pulizia, la piastra di compensato fenolico, il kit prefabbricato, formato dai moduli e dalla piastra ottenuti con materiali di riciclo, e uno strato di materiale resinoso che aumenta l'aderenza e permette una circolazione sicura.

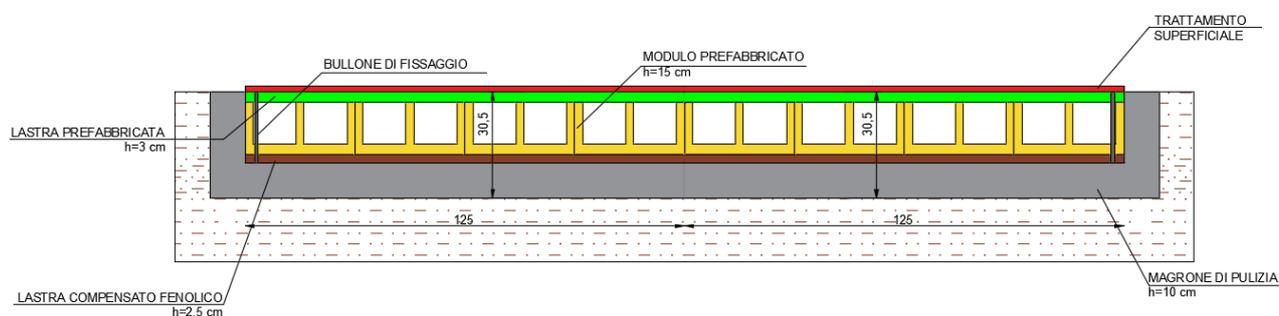


Figura 26 - Sezione della struttura

La figura mostra in scala i singoli elementi in modo tale da fornire un'immediata visualizzazione, che ora verranno analizzati in dettaglio.

5.1 Fondazione

Per definire la sottostruttura su cui appoggia la pavimentazione del modulo sono state eseguite diverse verifiche e la progettazione della pavimentazione sul terreno deve tener presente queste prove che differiscono per la composizione litostratigrafica e i valori geotecnici del terreno.

Tale sottostrato ha il compito di sostenere e diffondere i carichi presenti provenienti dalla pavimentazione.

Il sottofondo è rappresentato dal terreno presente o riportato, idoneamente compattato o stabilizzato. Il comportamento varia a seconda delle condizioni climatiche (temperatura, umidità, ghiaccio...) e quindi le sue deformazioni dipendono in base alle condizioni meteorologiche. Periodi piovosi portano a una maggiore deformazione mentre la minima deformabilità si ha in inverno, grazie all'azione indurente del ghiaccio.

La portanza del sottofondo si valuta mediante una costante di k (costante di Winkler) definita come rapporto tra la pressione esercitata e la deflessione conseguente. Una volta effettuata la prova di carico su piastra e calcolato il parametro k , si è valutata l' idoneità del terreno e la possibilità di costruirvi sopra la pista in oggetto.

Sul terreno debitamente preparato, è stato gettato uno strato di magrone, con uno spessore di circa 10 cm. Il magrone, formato da un calcestruzzo con un quantitativo di cemento inferiore a 150 kg/cm^3 e una curva granulometrica degli inerti a dimensione abbastanza grossolana, ha un duplice scopo: ottenere una superficie liscia e omogenea sulla quale applicare gli strati successivi e preservare la struttura dai danni recati dal diretto contatto con l'umidità del terreno presente.

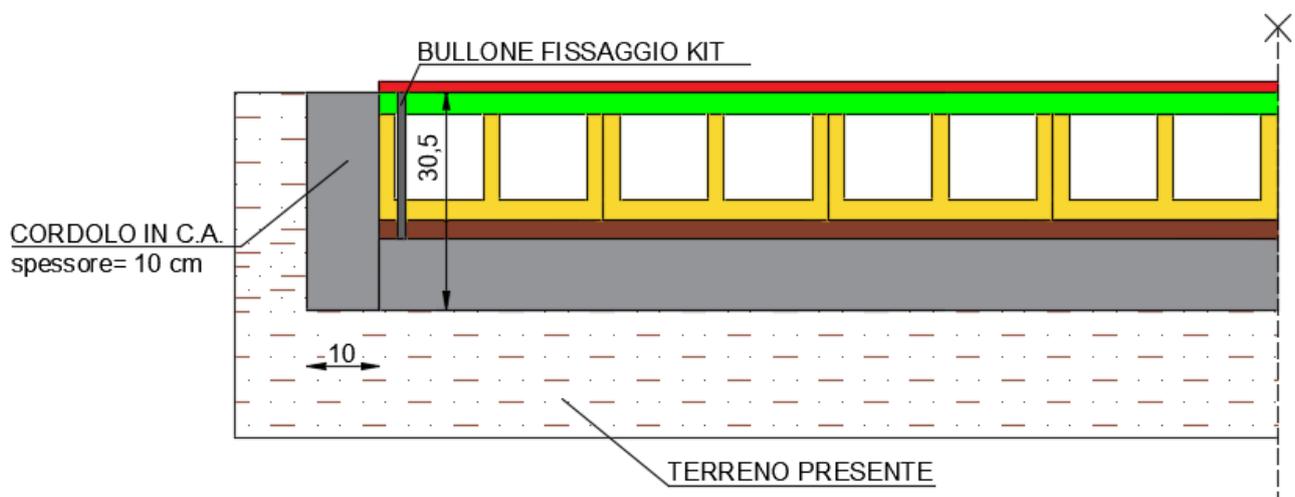


Figura 27 - Dettaglio Cordolo, terreno e bullone

5.2 Sovrastruttura prefabbricata

Nella figura sottostante, si possono osservare le singole componenti della sovrastruttura prefabbricata, composta dalla piastra superiore e la base d'appoggio, detta sella, entrambe realizzate con la miscela di fresato e polipropilene, separate dal magrone mediante una lastra di compensato fenolico.

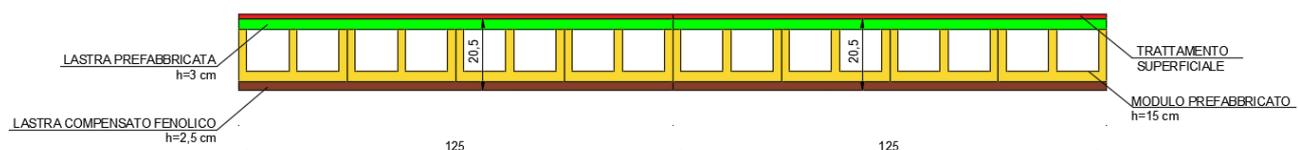


Figura 28 - Schema della sovrastruttura

Ora in dettaglio, verranno analizzate separatamente le singole componenti.

5.2.1 Compensato fenolico

Appoggiato allo strato di magrone viene posto un pannello di compensato fenolico con un'altezza di circa 2,5 cm.

Il compensato fenolico è un materiale ottenuto assemblando fogli molto sottili di legno che vengono pressati e incollati uno sull'altro. Lo strato esterno è costituito da una resina fenolica che lo rende impermeabile cosicché può proteggere tutta la struttura dalle risalite di umidità. Il legno utilizzato normalmente è quello della betulla, per le sue proprietà di creare una superficie stabile, liscia, durevole e già da sola altamente resistente all'acqua.

La resina fenolica è una plastica termoindurente, cioè prende forma generando calore durante una reazione chimica. Questo a differenza di altri materiali plastici, che vanno fusi sopra l'elemento da rivestire, evita l'aumento di costi dovuto all'operazione di stampaggio a iniezione. Oltre ad essere idrofobo, il compensato fenolico rende i pannelli duri e stabili, resistenti alla rottura e alla spaccatura degli elementi di fissaggio. La sua superficie è liscia e regolare ed è adatta ad accogliere prodotti e additivi per rendere la superficie più duratura nel tempo.

Per far aderire la parte di struttura superiore, sulla superficie verrà direttamente colato del polipropilene liquido che fisserà i blocchi prefabbricati, al fine di evitare dei cedimenti o spostamenti differenziali di quest'ultimi.

5.2.2 Modulo prefabbricato (piastra e base d'appoggio)

Il modulo prefabbricato rappresenta il cuore di tutta la struttura in oggetto. È costituito da una sella che svolge la funzione di appoggio e sostegno e una piastra superiore di chiusura che ha il compito di distribuire i carichi e formare una superficie di percorrenza.

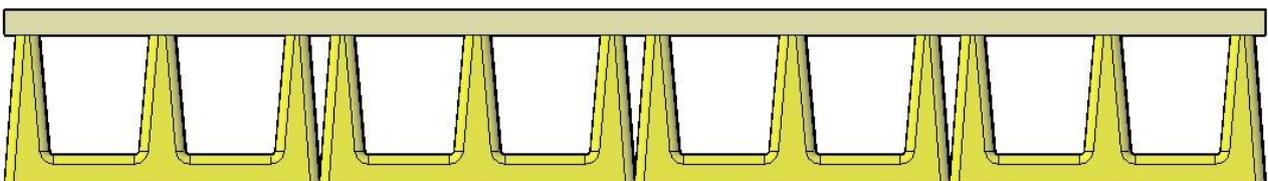


Figura 29 - Sezione Piastra di chiusura e sella (o base d'appoggio)

Il singolo travetto è costituito da un profilo particolare, con una base d'appoggio piena e tre sponde trapezoidali, come si può osservare in figura.

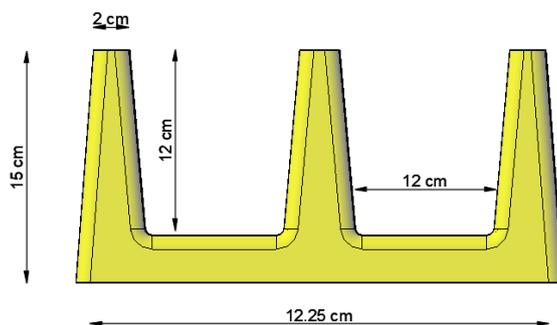


Figura 30 - Elemento singolo quotato

La piastra ha forma quadrata di lato 1,25 m e spessore di 3 cm. Essa viene appoggiata sui setti del profilo sottostante e fissata ad essi tramite 4 bulloni ai vertici della lastra.

Per quanto riguarda la scelta dei materiali per comporre questo “kit” si è operato su diversi fronti. Prima di tutto la definizione della percentuale dei componenti tra il conglomerato bituminoso di recupero e il polipropilene e, d’altro canto, la pezzatura granulometrica ottimale del fresato da utilizzare.

Si è fatto ricorso alla normativa UNI EN 13108-8 e UNI EN 12697 le quali forniscono i criteri per le prove di resistenza, per testare vari provini con differenti mescole analogamente alle prove descritte in precedenza.

La prima prova è stata quella della caratterizzazione granulometria, attraverso il consulto della UNI EN 933, del fresato di recupero così come veniva prodotto a freddo. Tale analisi è stata eseguita prima e dopo l’estrazione del bitume, e i risultati sono riportati nei grafici sottostanti.

Riferimento	Setacci [mm]	Trattenuto [%]	Passante cumulativo [%]
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=31.5 mm	0.0	100.0
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=25 mm	0.0	100.0
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=22.4 mm	0.0	100.0
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=20 mm	0.9	99.1
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=16 mm	4.5	94.5
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=14 mm	2.4	92.2
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=12.5 mm	2.9	89.3
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=11.2 mm	3.6	85.7
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=10 mm	4.2	81.5
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=8 mm	10.4	71.1
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=6.3 mm	10.9	60.2
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=5.6 mm	6.3	53.9
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=4 mm	11.7	42.2
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=2 mm	12.9	29.3
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=1 mm	9.1	20.2
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=0.5 mm	7.8	12.5
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=0.25 mm	5.2	7.2
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=0.125 mm	4.5	2.8
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio d=0.063 mm	0.9	1.9
Fresato dopo estrazione bitume	Setaccio Fondo	1.9	0.0

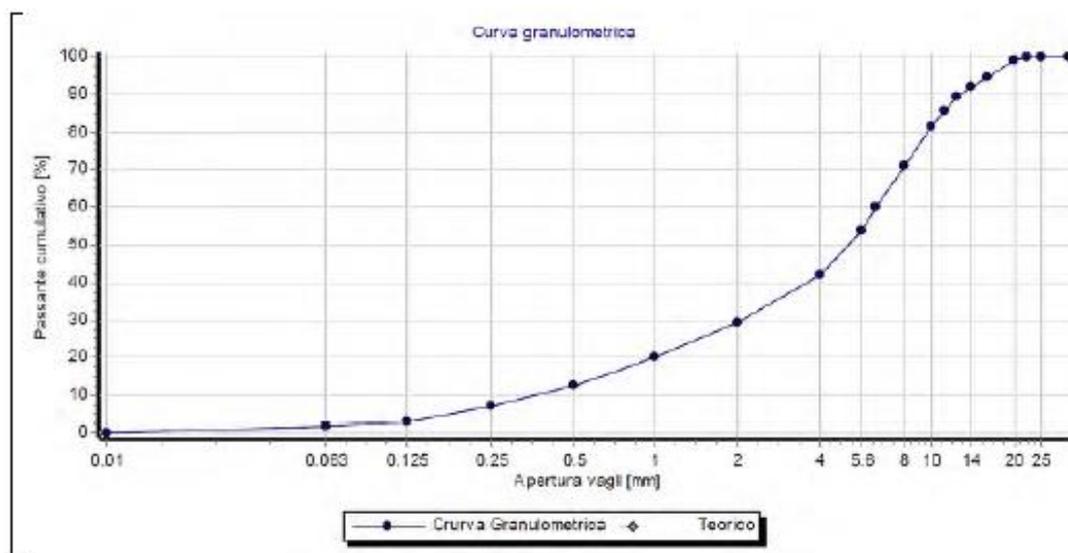


Tabella 16 - Curva granulometria del fresato dopo l'estrazione del bitume

A questo punto tutto il fresato è stato suddiviso secondo tre pezzature diverse per ottenere dei provini da testare con le plastiche selezionate. Le tre classi di pezzatura vanno da: 0 a 22,4 mm la più grossolana, da 0 a 14 mm quella intermedia e, la più fine, da 0 a 4 mm.



Figura 31 – Fresato pezzatura 0/14 mm



Figura 32 - Fresato pezzatura 0/22,4 mm



Figura 33 - Fresato pezzatura 0/4 mm

L'obiettivo è quello di trovare la miscela ottimale sia per il modulo strutturale che per la piastra di superficie.

Per la necessità di ottenere una superficie liscia e compatta si è scelta la pezzatura inerente alla terza classe, perché maggiormente adattabile al progetto in esame, e, inoltre, più facilmente adattabile al processo di stampo. Inizialmente, si pensava di produrre il materiale per estrusione attraverso una vite senza fine, e la presenza di grani troppo grossolani avrebbe potuto inceppare il meccanismo.

Grande attenzione e studio ha avuto anche la scelta della materia plastica da mescolare al fresato. Si sono effettuate diverse prove facendo variare la percentuale di talco e fibre di vetro da aggiungere alla plastica riciclata, ottenuta dai rifiuti.

Una volta ottenuto il composto che meglio risponde alle prove di laboratorio, si è provveduto alla creazione di uno stampo per la realizzazione della mattonella di superficie e dell'elemento di supporto.

Inizialmente, si sono utilizzati i metodi tradizionali per riscaldare e poi pressare la miscela conglomerato-polipropilene, ma si sono osservate rapide perdite di temperatura e quindi difetti importanti nello stampaggio del modulo. Anche i tradizionali mantelli riscaldanti in uso per tutti i materiali stradali non portavano a un successo dell'operazione di stampaggio.

Si è studiata, quindi, una metodologia per ottenere una miscela omogenea che, dopo compressioni, presenti meno discontinuità possibili, che ne inficino la resistenza.

Infine, si sono utilizzati degli stampi con le dimensioni desiderate, che tramite pressatura fornivano il prodotto finito più aderente alle richieste di progetto.

La miscela, opportunamente preparata in modo da essere il più omogenea possibile, viene introdotta all'interno dello stampo e pressata a freddo. Successivamente, il materiale viene scaldato cosicché il polipropilene possa assumere la forma richiesta e inglobare il fresato.

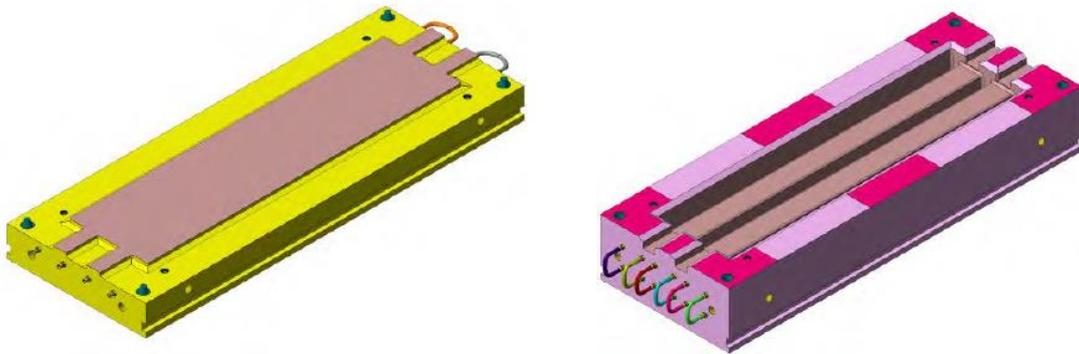


Figura 34 - Stampo Travetto, parte mobile e parte fissa

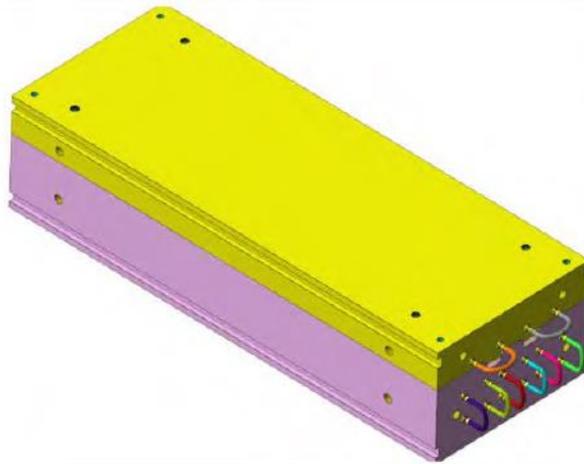


Figura 35 - Stampo Travetto completo



Figura 36 – Immagine reale dello stampo



Figura 37 – Immagine dei Travetti post-stampo

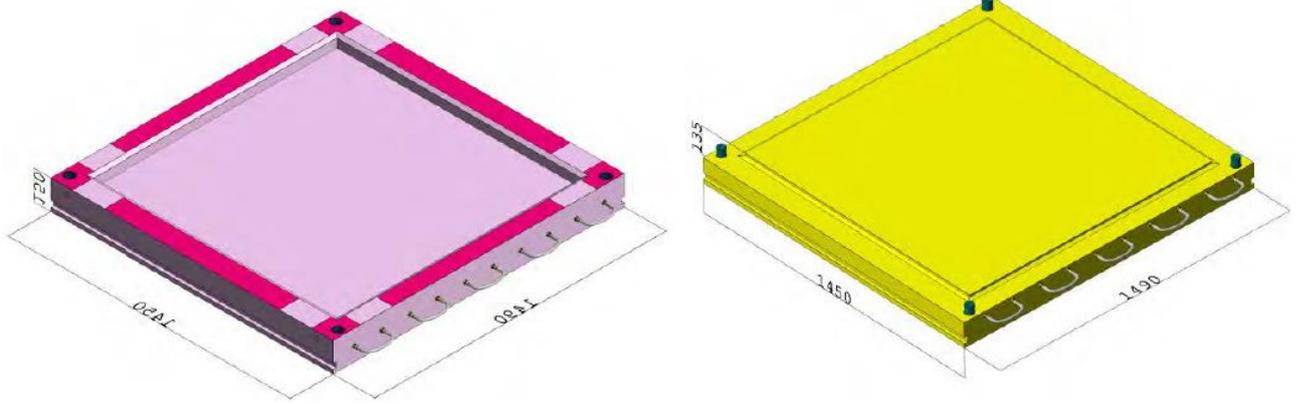


Figura 38 - Stampo Piastra, parte mobile e parte fissa

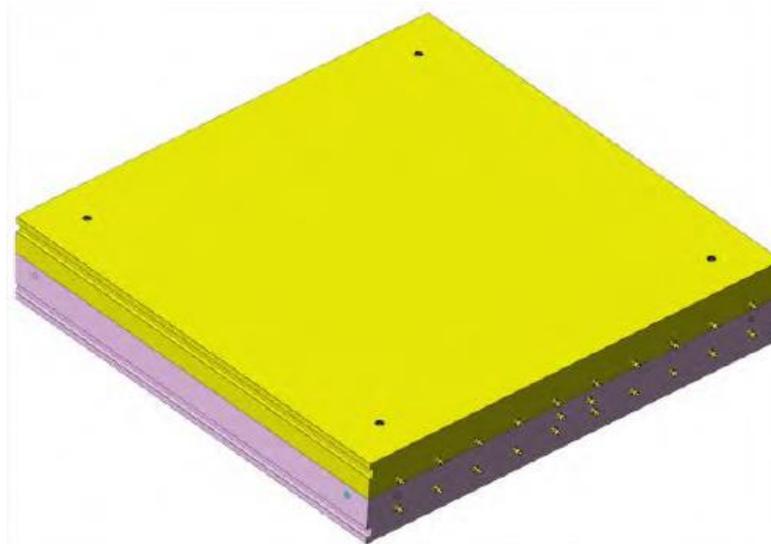


Figura 39 - Stampo piastra completo



Figura 40 – Immagine dello stampo per realizzare la piastra



Figura 41 – Immagine della Piastra post-stampo



Figura 42- Immagine del Modulo prefabbricato (4 travetti e una piastra)



Figura 43 - Dettaglio1 del modulo prefabbricato



Figura 44 - Dettaglio 2 del modulo prefabbricato

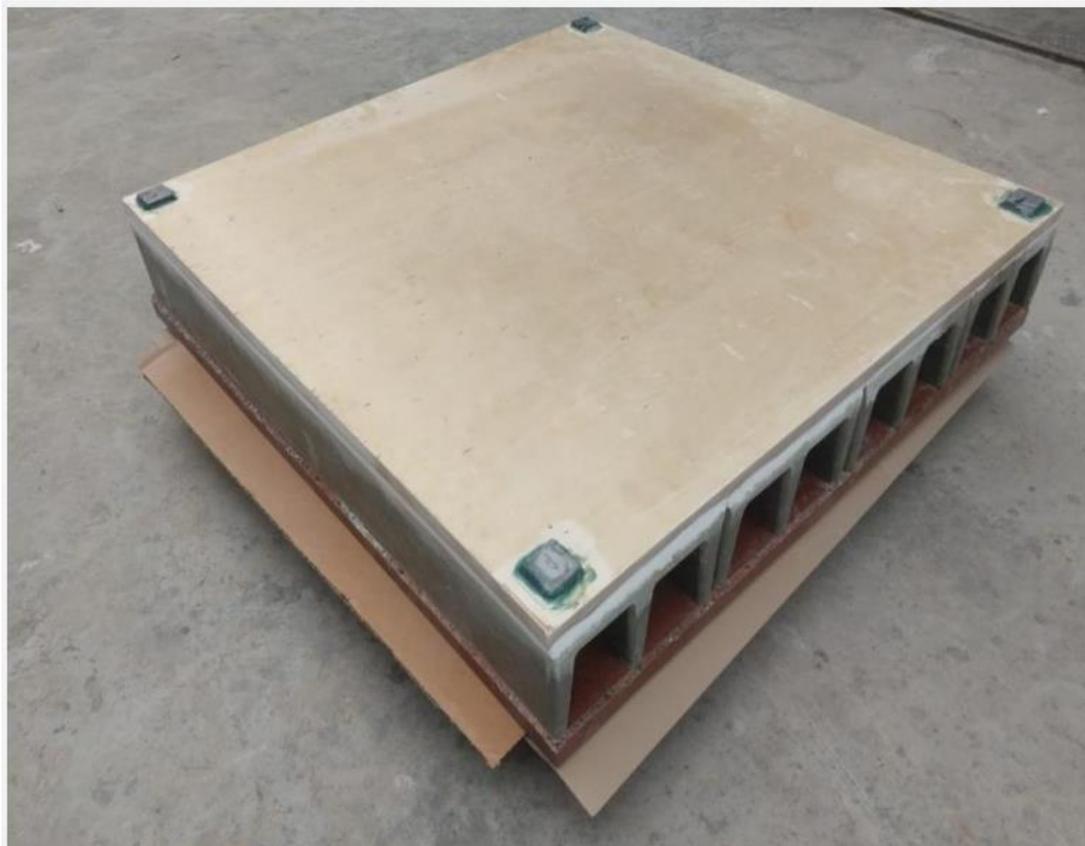


Figura 45 - Parte inferiore del pannello (visione dei 4 bulloni di serraggio)

5.2.3 Trattamento superficiale

Il materiale ottenuto dallo stampaggio per la piastra risulta molto liscio dopo l'operazione di stampaggio. Questa particolarità è un vantaggio per quanto riguarda la planarità e l'omogeneità della pista ciclabile, ma la rende al contempo estremamente pericolosa, soprattutto, in condizioni atmosferiche di bagnato.

Dopo un attento studio, si è pensato di rivestirla con un materiale che garantisca una maggiore aderenza, resistendo al continuo passaggio delle ruote dei mezzi transitanti.

La situazione che si viene a presentare è molto simile a quella dei ponti dei mezzi navali, sempre sollecitati in situazioni umide.

Si cerca, pertanto, un analogo rivestimento che sia di facile manutenzione e risponda efficientemente alla nostra problematica. Si è scelta una vernice, utilizzata nell'ingegneria navale, che prima di tutto riesce ad aderire al materiale plastico della struttura e rimanere intatta per molto tempo.



Figura 46 - Rugosità della superficie lavorata

In accordo con la consueta segnaletica delle piste ciclabili, il colore della vernice sarà il rosso e su di essa verranno anche evidenziate la divisione tra le corsie, il senso di percorrenza e altre informazioni utili secondo il codice stradale.

Per valutare l'aderenza fornita da questo strato di materiale si è ricorsi alla prova di skid test che consiste nella determinazione della resistenza di attrito di una superficie.

Per valutare il grado di scivolosità di una superficie, viene rilasciato un pattino che striscia sul campione e continua la sua corsa descrivendo un certo angolo. Quanto più è piccolo tale angolo, tanto maggiore sarà l'aderenza del materiale.

Ad ogni altezza raggiunta viene associato un valore compreso tra 0 e 150, detto PVT.

Nella prova eseguita, il provino è stato mantenuto a 18 °C e si sono eseguite cinque diverse oscillazioni su tre porzioni distinte, misurando ogni volta il coefficiente PVT.

Superficie esaminata	Pendenza superficie	Velocità vento	Temperatura a superficie	Temperatura pattino prima della prova	Temperatura pattino dopo della prova	Temperatura media pattino durante la prova	Misurazioni	Misurazioni	Coefficiente di correzione della temperatura (Tab. 3)	PTV	PTV medio superficie esaminata
							v_i	V_{medio}			
a	0	0,0	18,0	18,0	18,0	18	62	62,0	-1	61	61
							62				
							62				
							62				
							62				
b	0	0,0	18,0	18,0	18,0	18	60	59,2	-1	58	61
							59				
							59				
							59				
							59				
c	0	0,0	18,0	18,0	18,0	18	59	59,0	-1	58	61
							59				
							59				
							59				
							59				

Tabella 17 - Analisi Skid test provini

Il coefficiente di correzione è stato ricavato dalla normativa, secondo la seguente tabella, che si basa sulle temperature del pattino:

Correzione temperatura pattino		
36	40	3
30	35	2
23	29	1
19	22	0
16	18	-1
11	15	-2
8	10	-3
5	7	-4

Tabella 18 - Coefficienti correttivi per ogni T

Il valore medio ottenuto è pari a 61 e le classi di prestazione inserite nella Norma UNI 1504-2 sono tre, precisamente:

- Classe 1: ambiente indoor umido ≥ 40 ;
- Classe 2: ambiente indoor secco ≥ 40 ;
- Classe 3: ambiente outdoor umido ≥ 55 ;

In base a questi valori, lo strato di rivestimento utilizzato per la piastra di richiusura rientra perfettamente nei requisiti richiesti per la classe 3.

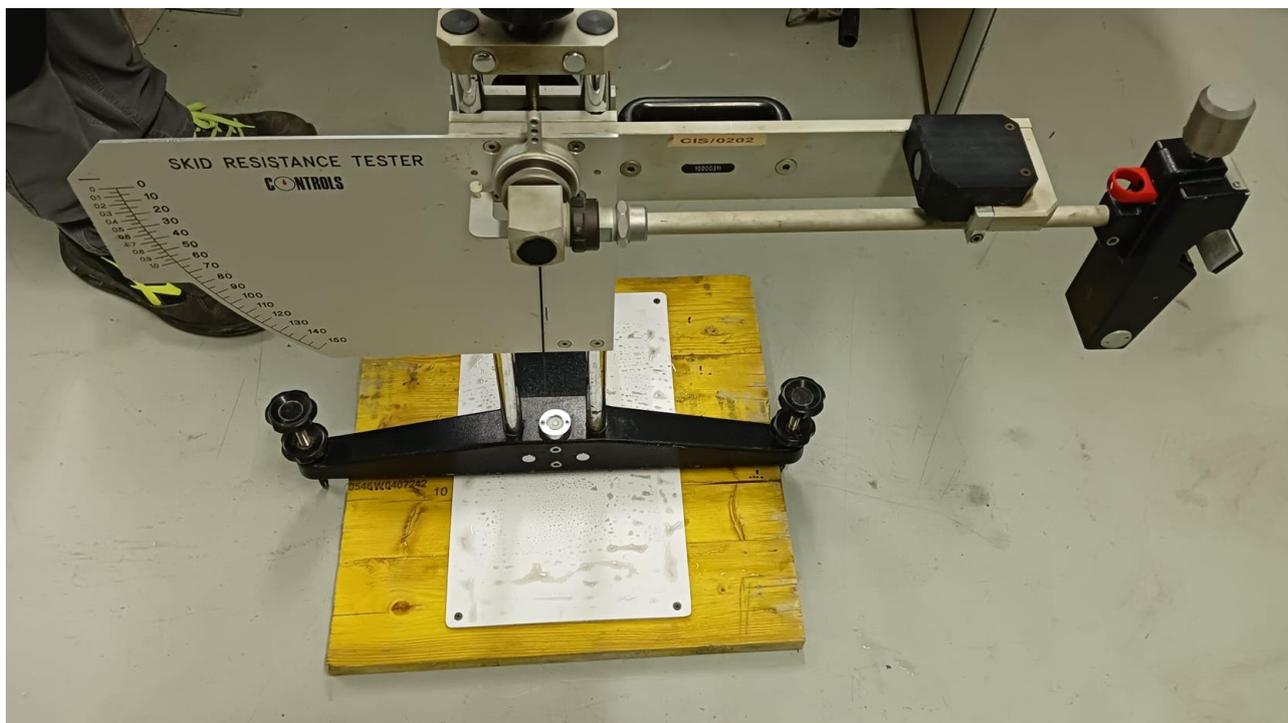


Figura 47 - Macchinario per l'esecuzione delle prove di Skid test

Per quanto riguarda i sottoservizi, per una manutenzione più tempestiva ed efficace, alcuni sensori rileveranno, all'interno del modulo prefabbricato, concentrazioni anomale di gas, quali metano o gas facilmente infiammabili, o perdite di acqua.

Importante rilievo è stato dato alla misurazione della qualità dell'aria e al rilevamento della presenza di polveri sottili. Attraverso la raccolta di campioni di atmosfera si analizzeranno le componenti chimico fisiche delle polveri sottili raccolte, onde prevenire danni alla salute dell'uomo, anche molto deleteri.

I sensori saranno poi cablati tra loro e collegati ad una stazione di riferimento. Questa struttura minima sarà poi ripetuta il numero di volte necessario per coprire la tratta di interesse, offrendo la possibilità di scalare il sistema in maniera agevole. Questa struttura minima prevede il collegamento dei riquadri sensorizzati ad un collegamento unico sia per i dati sia per l'alimentazione.

Per la trasmissione di segnali via cavo si svilupperà un protocollo di comunicazione ad hoc, tramite una stazione di riferimento per la struttura che include:

- Un centro di raccolta di informazioni connesse alla struttura, in cui saranno centralizzati i dati dei sensori;
- Un centro di alimentazione energetica, che fornirà l'energia necessaria alla struttura;
- Un'interfaccia di comunicazione per connettersi, via LoRA (un protocollo di comunicazione che compete con altre reti wireless), ad un dispositivo esterno per il caricamento su cloud dei dati.

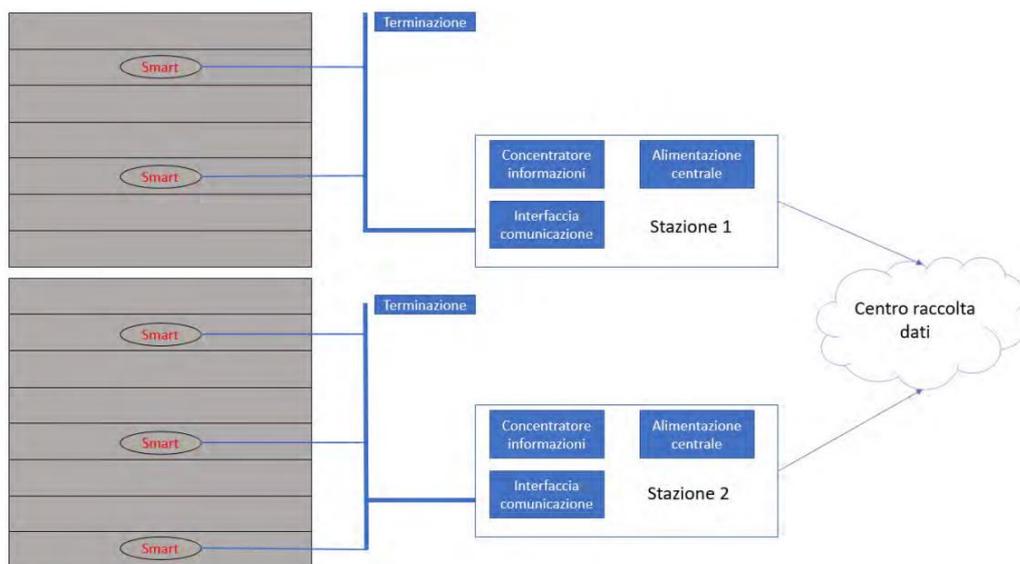


Figura 49 . Schema della struttura della connessione tra i sensori

Il sistema di sensori sopra descritto è indispensabile per un tratto ciclo pedonale innovativo come l'ECOSMARTROAD 2.0, poiché unisce e collega i cittadini, con l'ambiente circostante e la via di comunicazione, e facilita l'amministrazione locale nel controllare, organizzare e prevedere opere future o lavori di manutenzioni tempestivi e meno dispendiosi.

6. Modellazione e relazione di calcolo della struttura della pista ciclabile

6.1 Descrizione del modello

La modellazione della struttura è stata eseguita con il software di calcolo PRO_SAP (PROfessional Structural Analysis Program).

Come primo passo, si è progettato tramite il programma AutoCad il modello 3D dei moduli prefabbricati con la piastra di chiusura e il pannello inferiore.

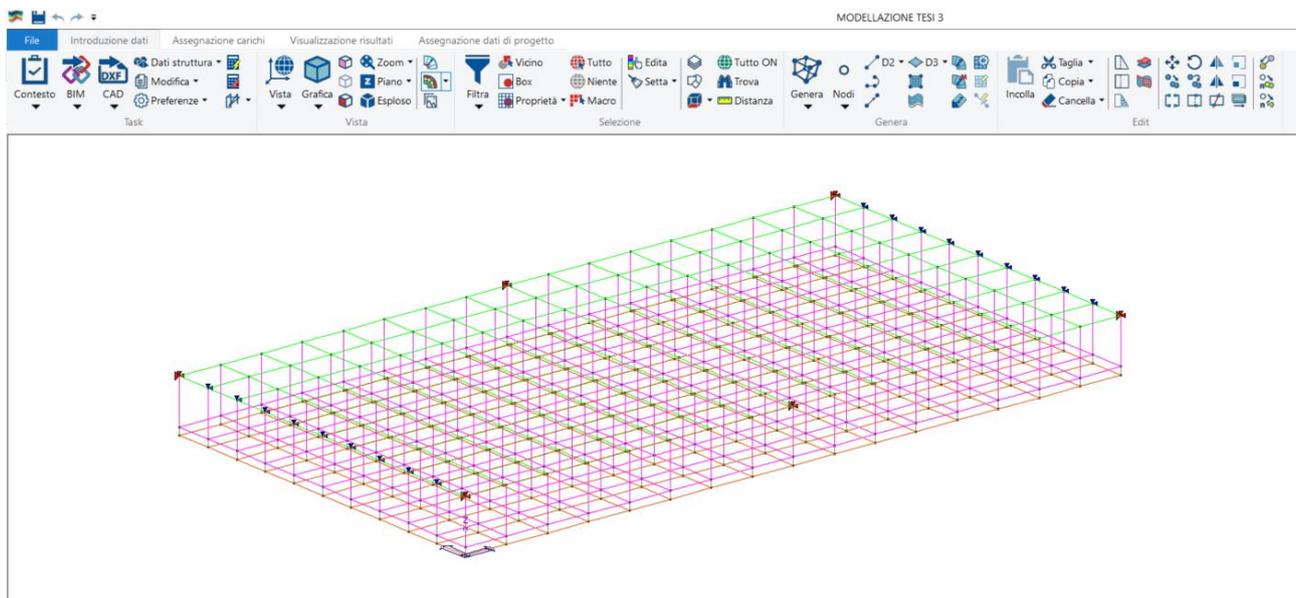


Figura 50 - Immagine interfaccia Software e schema dei nodi della struttura

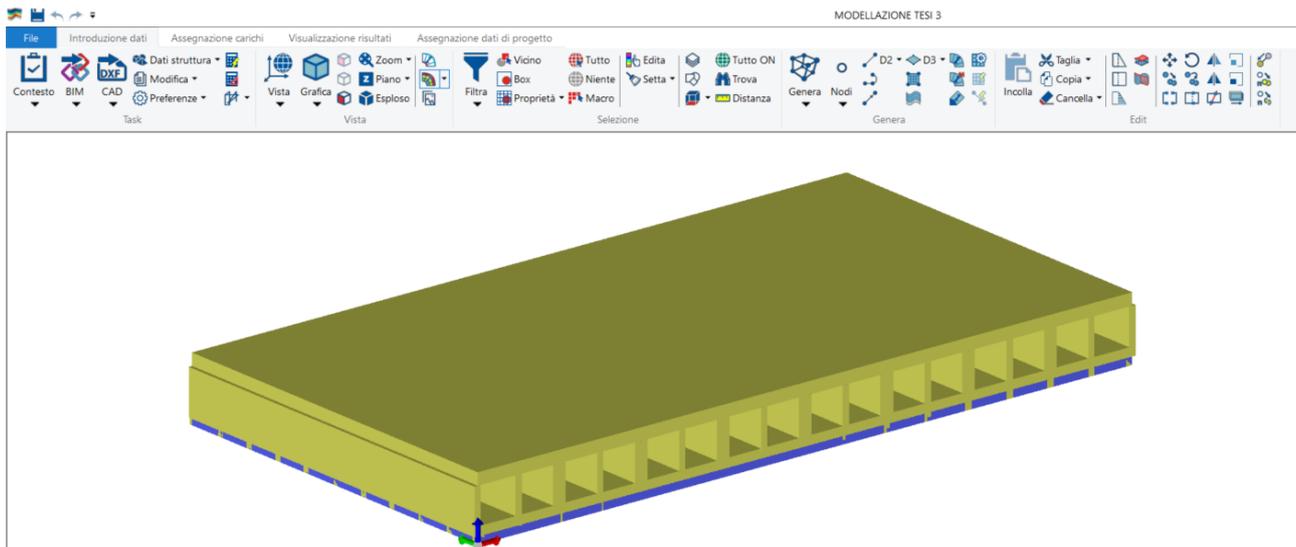


Figura 51 - Schema 3D struttura

Una volta impostata la geometria generale della struttura, si è provveduto a suddividere gli elementi presenti in porzioni ridotte, attraverso l'uso di una mesh di 12,5 cm di lato.

Per meglio rappresentare il comportamento reale cui si dovrà sottoporre la struttura, si è scelto di affiancare due moduli, così da ottenere una reale porzione di pista ciclabile, con una larghezza totale di 2,5 metri e una profondità di 1,25 metri. Questo sistema è il minimo tratto di pista che si può prendere in considerazione per tutte le analisi e verifiche. Replicando n-volte questa unità modulare, si potrà ottenere una tratta ciclo pedonale di qualunque lunghezza che manterrà le stesse caratteristiche e comportamento.

Come si vede dalla figura 46, sull'intera struttura è stato evidenziato un numero notevole di punti, detti nodi. Questi permetteranno una puntuale analisi e una precisione nella differenziazione dei carichi applicati e delle pressioni dovute al traffico veicolare.

Attraverso i nodi, si possono evidenziare i singoli elementi shell e così ottenere una modellazione accurata senza eccessivi particolarismi.

La seguente tabella indica il numero di punti e shell considerati:

Modellazione della geometria e proprietà meccaniche:	
nodi	561
elementi d2 (link rigido)	187
elementi D3 (elementi shell)	650
Dimensione del modello strutturale [cm]:	
X min =	0.00
Xmax =	250.00
Ymin =	0.00
Ymax =	125.00
Zmin =	0.00
Zmax =	17.50
Strutture:	
Pilastri	SI
Pareti	SI
Tipo di vincoli:	
Nodi vincolati rigidamente	SI
Fondazioni di tipo platea	SI

Tabella 19 - Parametri software

Per simulare l'appoggio tra il modulo prefabbricato e la lastra di compensato fenolico sono stati disegnati e progettati piccoli pilastri, in materiale rigido segnati in tabella come "link rigidi". Tale accorgimento non altera in nulla il risultato delle verifiche, in quanto l'altezza complessiva è quella dello strato in compensato fenolico.

Id	Tipo	Area	A V2	A V3	Jt	J 2-2	J 3-3	W 2-2	W 3-3	Wp 2-2	Wp 3-3
1	LINK RIGIDO-Rettangolare: b=2.25 h=2.25	5.06	4.22	4.22	3.60	2.14	2.14	1.90	1.90	2.85	2.85

Tabella 20 - Parametri geometrici link rigidi

Dove le sigle identificano gli elementi strutturali, e in particolare in tabella si riportano quelli significativi:

Area	area della sezione
A V2	area della sezione/fattore di taglio (per il taglio in direzione 2)
A V3	area della sezione/fattore di taglio (per il taglio in direzione 3)
Jt	fattore torsionale di rigidezza
J2-2	momento d'inerzia della sezione riferito all'asse 2
J3-3	momento d'inerzia della sezione riferito all'asse 3
W2-2	modulo di resistenza della sezione riferito all'asse 2
W3-3	modulo di resistenza della sezione riferito all'asse 3
Wp2-2	modulo di resistenza plastico della sezione riferito all'asse 2
Wp3-3	modulo di resistenza plastico della sezione riferito all'asse 3

Tabella 21 - Legenda software

Ogni nodo è individuato dalle coordinate cartesiane nel sistema di riferimento globale (X Y Z). Ad ogni nodo è eventualmente associato un codice di vincolo rigido, un codice di fondazione speciale, ed un set di sei molle (tre per le traslazioni, tre per le rotazioni). Le tabelle sotto riportate riflettono le succitate possibilità. In particolare per ogni nodo viene indicato in tabella:

Nodo	numero del nodo.
X	valore della coordinata X
Y	valore della coordinata Y
Z	valore della coordinata Z

Tabella 22 - Sistema di riferimento software

Per i nodi ai quali sia associato un codice di vincolo rigido, un codice di fondazione speciale o un set di molle viene indicato in tabella:

Nodo	numero del nodo.
X	valore della coordinata X
Y	valore della coordinata Y
Z	valore della coordinata Z
Note	eventuale codice di vincolo (es. v=110010 sei valori relativi ai sei gradi di libertà previsti per il nodo TxTyTzRxRyRz, il valore 1 indica che lo spostamento o rotazione relativo è impedito, il valore 0 indica che lo spostamento o rotazione relativo è libero).
Note	(FS = 1, 2,...) eventuale codice del tipo di fondazione speciale (1, 2,... fanno riferimento alle tipologie: plinto, palo, plinto su pali,...) che è collegato al nodo. (ISO = "id SIGLA") indice e sigla identificativa dell' eventuale isolatore sismico assegnato al nodo
Rig. TX	valore della rigidezza dei vincoli elastici eventualmente applicati al nodo, nello specifico TX (idem per TY, TZ, RX, RY, RZ).

Tabella 23 - Specifiche nodi

Il programma utilizza per la modellazione elementi a tre o quattro nodi denominati in generale shell.

Ogni elemento shell è individuato dai nodi I, J, K, L (L=I per gli elementi a tre nodi).

Ogni elemento è caratterizzato da un insieme di proprietà riportate in tabella che ne completano la modellazione.

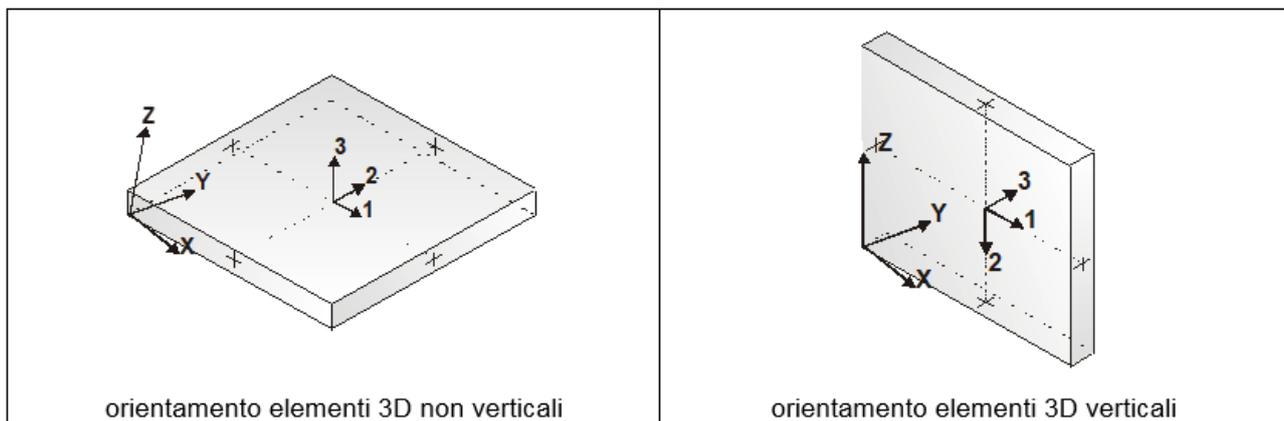


Tabella 24- Sollecitazioni elementi shell

In particolare per ogni elemento viene indicato in tabella:

Elem.	numero dell'elemento
Note	codice di comportamento: <i>Guscio</i> (elemento guscio in elevazione non verticale) <i>Guscio fond.</i> (elemento guscio su suolo elastico) <i>Setto</i> (elemento guscio in elevazione verticale) <i>Membrana</i> (elemento guscio con comportamento membranale)
Nodo I (J, K, L)	numero del nodo I (J, K, L)
Mat.	codice del materiale assegnato all'elemento
Spessore	spessore dell'elemento (costante)
Wink V	costante di sottofondo (coefficiente di Winkler) per la modellazione del suolo elastico verticale
Wink O	costante di sottofondo (coefficiente di Winkler) per la modellazione del suolo elastico orizzontale

Tabella 25 - Specifiche elementi

Anche le caratteristiche del materiale vengono caricate nel programma, scegliendole tra quelle in dotazione. Per il Materiale da considerare in questa sede è stato scelto materiale di tipo generico per il modulo composto da fresato di recupero e polipropilene e, dovendo scegliere un

materiale con una rigidità notevolmente maggiore, per i link rigidi si è scelto un materiale generico con un elevato modulo di Young.

I materiali utilizzati nella modellazione sono individuati da una sigla identificativa ed un codice numerico (gli elementi strutturali richiamano quest'ultimo nella propria descrizione). Per ogni materiale vengono riportati in tabella i seguenti dati:

Young	modulo di elasticità normale E
Poisson	coefficiente di contrazione trasversale ν
G	modulo di elasticità tangenziale
Gamma	peso specifico
Alfa	coefficiente di dilatazione termica
Fattore di confidenza FC m	Fattore di confidenza specifico per materiale; (è riportato solo se diverso da quello globale della struttura)
Fattore di confidenza FC a	Fattore di confidenza specifico per l'armatura (è riportato solo se diverso da quello globale della struttura)
Elasto-plastico	Materiale elastico perfettamente plastico per aste non lineari
Massima compressione	Massima tensione di compressione per aste non lineari
Massima trazione	Massima tensione di trazione per aste non lineari
Fattore attrito	Coefficiente di attrito per aste non lineari
Rapporto HRDb	Rapporto di hardening a flessione
Rapporto HRDv	Rapporto di hardening a taglio

Tabella 26 - Specifiche materiali

Vengono inoltre riportate le tabelle contenenti il riassunto delle informazioni assegnate nei criteri di progetto in uso.

Id	Tipo / Note	V. caratt.	V. medio	Young	Poisson	G	Gamma	Alfa	Altri
157	Materiale inf. rigido no peso E = 1.000e+07-materiale E = 1.000e+07			1.000e+11	0.0	5.000e+10	0.0	1.20e-05	
	Rapporto HRDb								1.00e-05
	Rapporto HRDv								1.00e-05
158	POLIPROPILENE + FRESATO-materiale E = 2.000e+04			2.000e+08	0.30	7.692e+07	843.6	12.0e-05	
	Rapporto HRDb								1.00e-05
	Rapporto HRDv								1.00e-05

Tabella 27 - Note materiali

6.2 Analisi dei carichi

In accordo con le regole dettate dalle NTC (Norme Tecniche delle Costruzioni) le verifiche per la sicurezza sono basate sul modello semiprobabilistico agli stati limite attraverso l'impiego dei coefficienti parziali.

La sicurezza e le prestazioni di un'opera devono essere confrontate agli stati limite, che possono verificarsi durante la vita nominale di progetto. La vita nominale, in simbolo V_n , di una struttura è un concetto che fornisce il riferimento per valutare le azioni variabili che devono consentire una durabilità nel tempo. Normalmente è in rapporto molto stretto con lo scopo e la destinazione d'uso dell'opera, durante la quale deve mantenere lo stesso livello di sicurezza. Viene valutata in anni e nel caso in oggetto deve essere di almeno 50 anni.

Per stato limite si intende lo stato superato il quale l'opera non soddisfa più la normativa vigente e, in particolare, le opere strutturali devono rispondere ai seguenti requisiti:

- Sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi (SLU);
- Sicurezza nei confronti degli stati limite di esercizio (SLE);
- Durabilità;
- Robustezza;

Per verificare lo SLU, bisogna controllare che le sollecitazioni agenti sulla struttura non superino le tensioni di rottura del materiale. Per gli SLE, la normativa non riporta specifiche indicazioni. Tuttavia sarà importante mantenere un costante monitoraggio sull'opera per tempestivamente segnalare eventuali ammaloramenti della superficie e delle prestazioni.

Inoltre, attraverso l'impiego di un incollante a base di polipropilene liquido, applicato sul pannello di compensato fenolico, vengono impediti i cedimenti relativi dei moduli prefabbricati, che minerebbero l'integrità strutturale.

I carichi considerati sono quelli prescritti dalle normative vigenti.

Prima di tutto, è stato valutato il peso proprio della struttura, considerando la densità e il volume dei moduli prefabbricati, ottenendo come valore:

$$g_1 = 9,2-9,6 \text{ kN/m}^3$$

Oltre al peso proprio bisogna considerare i carichi permanenti portati, ossia quei pesi che la struttura dovrà sempre sopportare ma che non hanno una funzione portante. In questo caso, si avrà:

$$g_2 \text{ (dovuto alla raccolta delle acque)} = 0,15 \text{ kN/m}^2$$

$$g_2 \text{ (peso degli impianti presenti)} = 0,4 \text{ kN/m}$$

Oltre ai carichi permanenti, si sono computati i sovraccarichi, utilizzando la EN 1991-2 sezione 5 (*“Actions on footways, cycle tracks and footbridges”*), dove vengono dettagliate le sollecitazioni da applicare su ponti o passerelle ciclo pedonabili.

In relazione al caso studio, si sono valutati i tre tipi di carico che la normativa indica.

Prima di tutto il carico folla considerato come distribuito, per il quale è fornita la formula del carico seguente:

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L + 30} \text{ kN/m}^2$$
$$q_{fk} \geq 2,5 \text{ kN/m}^2; q_{fk} \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$$

Dove L rappresenta la lunghezza del tratto considerato.

In forma semplificata, sempre la norma indica un valore fisso di:

$$q_{fk} = 5 \text{ kN/m}^2$$

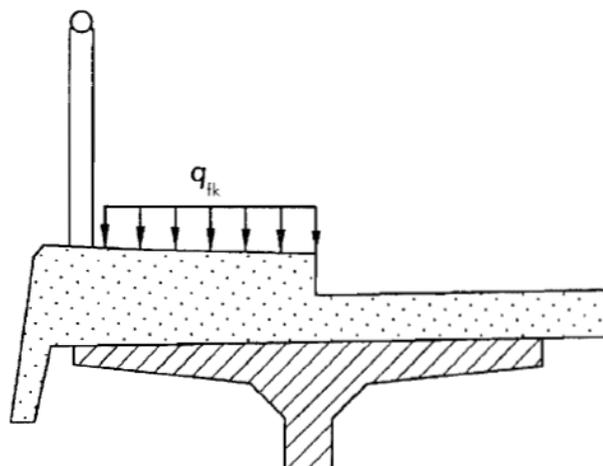


Figura 52 - Schematizzazione carico folla da normativa

La normativa obbliga di considerare anche un carico concentrato che agisce su una superficie quadrata di 10 cm di lato. Questo carico accidentale è fissato pari a:

$$Q_{fwk} = 10 \text{ kN}$$

Un'ulteriore sollecitazione è data da un veicolo di servizio (Q_{serv}), ma nel caso in questione non viene considerata poiché non è permesso il transito di tale mezzo sul tratto ciclabile.

Per pulizia della pista, i veicoli addetti transiteranno sulla strada adiacente e potranno lavorare sulla pavimentazione mediante bracci meccanici appositi.

Data l'ubicazione del progetto, anche il carico neve va considerato e la NTC 2018 definisce una formula dell'azione in base all'altitudine del sito. In particolare, la provincia di Cuneo viene definita come Zona 1 Alpina e la formula è la seguente:

Zona I - Alpina

Aosta, Belluno, Bergamo, Biella, Bolzano, Brescia, Como, Cuneo, Lecco, Pordenone, Sondrio, Torino, Trento, Udine, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli, Vicenza:

$$\begin{array}{ll} q_{sk} = 1,50 \text{ kN/m}^2 & a_s \leq 200 \text{ m} \\ q_{sk} = 1,39 [1 + (a_s/728)^2] \text{ kN/m}^2 & a_s > 200 \text{ m} \end{array} \quad [3.4.2]$$

Figura 53 - Estratto NTC carico neve

dove a_s rappresenta l'altitudine rispetto al livello del mare.

Considerando il comune di Alba ad un'altezza di 285 s.l.m. si perviene a:

$$q_{sk} = 1,60 \text{ kN/m}^2$$

La normativa indica anche l'azione eccezionale (da 80 a 40 kN) da applicare alla struttura, ma essendo prevista la messa in opera di una barriera che separerà il tratto ciclabile dalla sede stradale, questa sollecitazione non è stata considerata nel calcolo.

Molto importante è riuscire a definire la combinazione sia per gli stati limite ultimo che per quelli di esercizio.

La normativa fornisce le formule delle combinazioni, andando a pesare i carichi attraverso opportuni coefficienti moltiplicativi.

Possiamo trovare:

- Combinazione fondamentale generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Combinazione caratteristica (rara) generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

- Combinazione frequente generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Combinazione quasi permanente (SLE) generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Combinazione eccezionale (SLU), impiegata per le azioni eccezionali A:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Il simbolo “+” significa in tutte le formule “combinato con”.

Per quanto riguarda i coefficienti γ , la normativa indica anche gli effetti delle azioni, nelle verifiche agli stati limite ultimi, secondo la tabella sotto riportata:

Carichi permanenti G*	Favorevoli	γ_G	1,0
	Sfavorevoli		1,35
Carichi variabili relativi al traffico stradale o pedonale	Favorevoli	γ_Q	0
	Sfavorevoli		1,35
Altri carichi variabili**	Favorevoli	γ_Q	0
	Sfavorevoli		1,5

* questo valore copre il peso proprio degli elementi strutturali e non strutturali, peso del terreno

** questo valore copre la pressione orizzontale del terreno, azioni termiche e azione della neve

Tabella 28- Coefficienti γ

Per quanto riguarda i valori ψ delle combinazioni, la normativa suddivide tali coefficienti in ψ_1 , ψ_0 e ψ_2 . Il primo viene utilizzato come valore frequente per un carico che dovrebbe essere superato per un breve periodo di tempo. Il secondo tiene conto della probabilità scarsa che due o più azioni variabili compaiono simultaneamente. Infine, il terzo considera quei carichi quasi permanenti per un periodo di tempo sufficientemente lungo.

La tabella indica i coefficienti ψ per passerelle ciclopedonali, assunta dalla EN 1990:

Action	Symbol	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Traffic loads	gr1	0,40	0,40	0
	$Q_{f,ik}$	0	0	0
	gr2	0	0	0
Wind forces	F_{Wk}	0,3	0,2	0
Thermal actions	T_k	0,6 ¹⁾	0,6	0,5
Snow loads	$Q_{S,ik}$ (during execution)	0,8	-	0
Construction loads	Q_c	1,0	-	1,0

1) The recommended ψ_0 value for thermal actions may in most cases be reduced to 0 for ultimate limit states EQU, STR and GEO. See also the design Eurocodes.

Tabella 29 - Coefficienti ψ

Un'altra considerazione, che a questo punto necessita, è una raccomandazione riferita proprio alla combinazione delle azioni sui ponti ciclopedonali.

Il carico $Q_{f,ik}$ non va combinato con nessun'altra azione variabile estranea al traffico e l'azione della neve non può essere combinata con i carichi dati dal traffico, a meno di particolari eccezioni.

6.3 Prove per la valutazione della resistenza meccanica a rottura

Al modello strutturale sono stati simulati i carichi precedentemente descritti, il carico permanente, strutturale e portato, i carichi variabili, dati dalla folla, il traffico ciclabile e l'azione della neve.

Le verifiche vengono eseguite confrontando i valori delle sollecitazioni agenti sulla struttura, elaborati dal software dopo le opportune combinazioni dei casi di carico applicati, con la capacità resistente del materiale.

Per valutare questa caratteristica, è stata eseguita la prova a flessione su tre punti, seguendo i dettami della normativa EN 196-1 che fornisce la prassi per procedere al test.

Il macchinario utilizzato in laboratorio deve essere in grado di applicare carichi fino a 10 kN a una velocità di 50 N/s (± 10).

Occorre che abbia un dispositivo di flessione, composto da due rulli d'appoggio distanti 100 mm, situati nella parte inferiore del provino, e un terzo rullo di caricamento posto centralmente agli altri due.

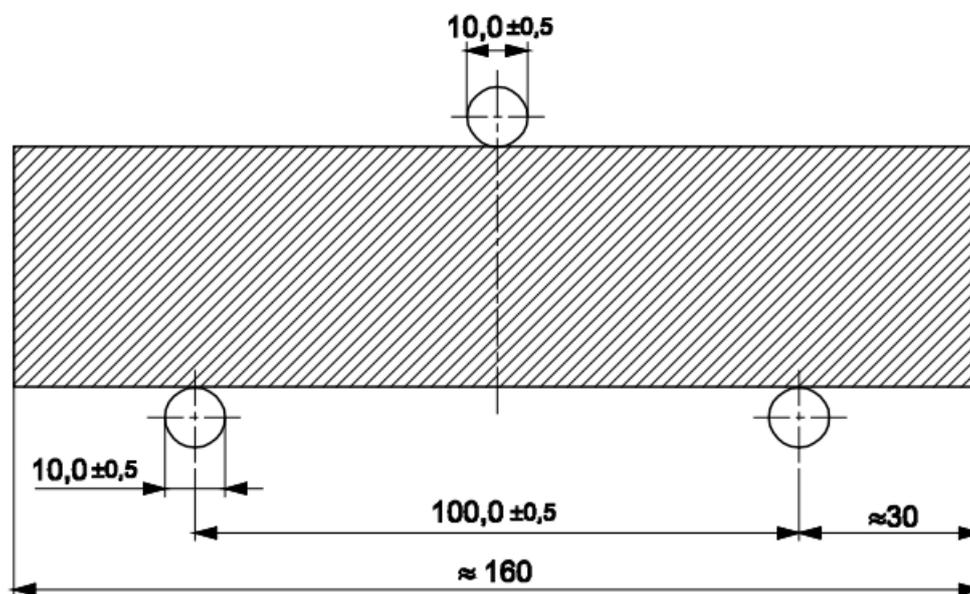


Figura 54 - Schema prova flessione su tre punti

I tre piani verticali ai tre rulli devono stare paralleli e equidistanti e perpendicolari alla direzione del provino e uno dei tre rulli d'appoggio deve potersi leggermente inclinare per garantire un carico uniforme su tutta la lunghezza, onde eliminare eventuali torsioni.

Una volta sistemato il provino sui due rulli d'appoggio, bisogna sollecitare verticalmente attraverso il terzo rullo sulla faccia opposta a quella di appoggio, aumentando gradualmente il carico alla velocità di 50 N/s, fino al raggiungimento della frattura.

La resistenza alla flessione, si calcola mediante la formula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

dove:

- R_f è la resistenza a flessione, in MPa;
- b è il lato della sezione del provino, in mm;
- F_f è il carico applicato al centro alla frattura, in N;
- l è la distanza tra i supporti, in mm.



Figura 55 – Immagine del macchinario prova di flessione su tre punti



Figura 56 - Particolare provino prova flessione su tre punti

Seguendo la procedura dettata dalla normativa, è stata eseguita una prima prova, ottenendo i risultati riportati nel diagramma sottostante:

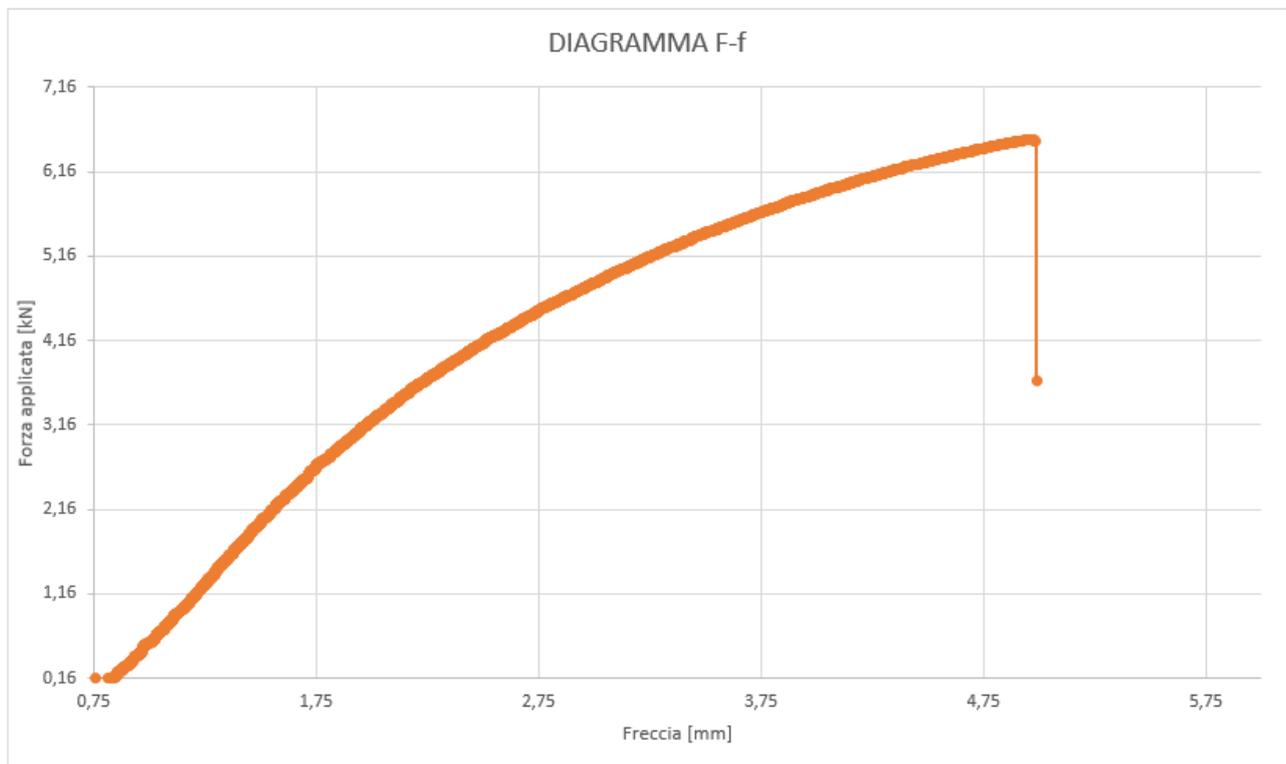


Figura 57 - Diagramma carico-freccia

Significativa è l'analisi del rapporto forza applicata, F , e la freccia, f , poiché il grafico rappresenta il comportamento del materiale sottoposto a un carico crescente nel tempo.

Inizialmente, il diagramma mostra un tratto quasi lineare, testimonianza di un comportamento elastico, seguito poi da un tratto curvilineo, segno di un comportamento plastico fino alla rottura, caratterizzata da un valore di F pari a circa 6.5 kN e una freccia pari a circa 5 mm.

Da questi valori, si può dedurre il grafico seguente, che mostra la relazione tra la tensione e la deformazione del provino, sottoposto a un carico concentrato crescente nel tempo.

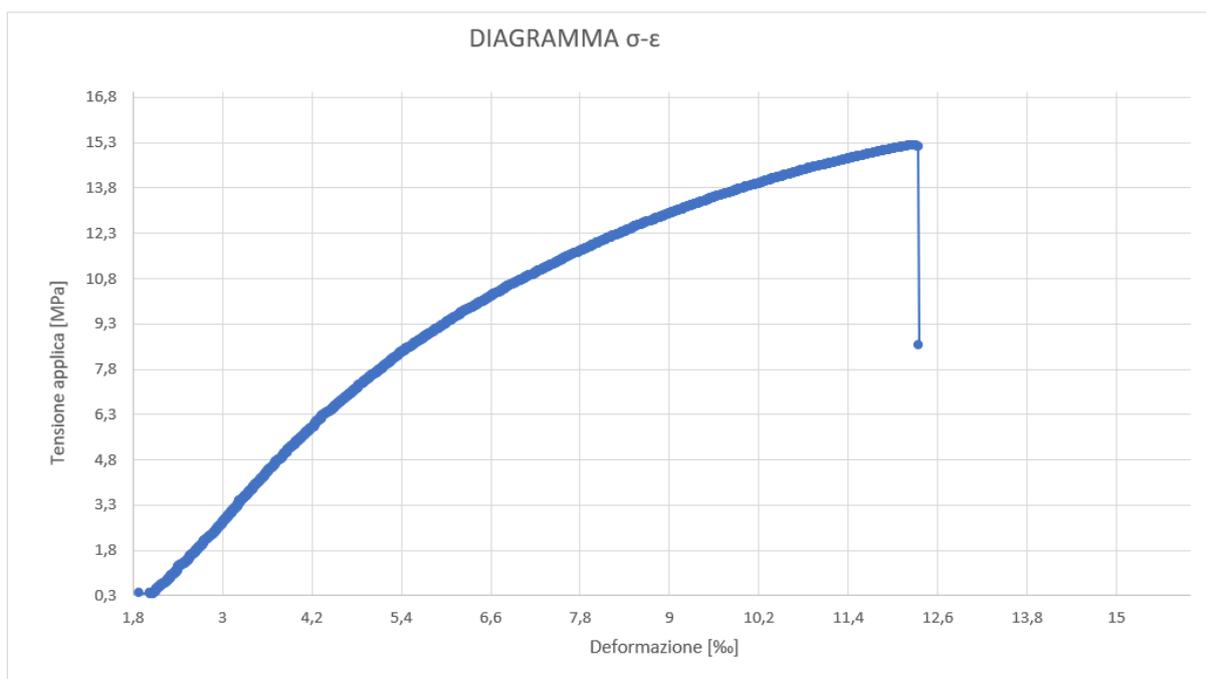


Figura 58 - Diagramma sforzo deformazione

Il grafico mostra la legge costitutiva del materiale con un primo tratto elastico, fino a circa una σ_y pari a 6,3 MPa, associata ad una deformazione di circa 4,4 ‰. Il tratto successivo mostra un andamento concavo che corrisponde al tratto a comportamento plastico, fino a una σ_u circa pari a 15 MPa, equivalente a una ϵ_u di circa 123‰, alla quale segue la rottura del provino.

L'andamento del grafico è molto simile nella forma a quello precedente, confermando il comportamento del provino.

Bisogna dire, però, che è stata necessaria una correzione della freccia, tenendo conto dell'accumulo delle deformazioni nel punto di carico. Per valutare, tale deformazione locale è stato usato un comparatore collegato alla macchina che ha valutato i diversi impatti sulla faccia del provino.



Figura 59 - Misura della deformazione locale nel punto di contatto del carico



Figura 60 – Deformazione locale dovuta alla forza puntuale applicata dalla macchina

Si riportano, le misure delle deformazioni locali per la correzione della freccia.

Campione	Misura 1 (mm)	Misura 2 (mm)	Misura 3 (mm)	Media (mm)
Provino 1 Test 1_intero_appoggio base maggiore	-0.253	-0.410	-0.472	-0.378
Provino 1 Test 2_moncone_appoggio base maggiore	-0.284	-0.188	-0.103	-0.192
Provino 3 Test 1_intero_appoggio base maggiore	-0.034	-0.117	-0.200	-0.117

Tabella 30 – Valutazione della correzione della freccia per le prove di flessione su 3 punti

Tali valori sono stati decurtati alla freccia totale misurata.

La prova è stata ripetuta su cinque provini, ottenendo risultati analoghi, considerando i casi di carico su entrambe le facce del provino, quella superiore e quella inferiore. I risultati ottenuti sono mostrati nella seguente tabella, in cui le prove sono indicate con:

- prima lettera A, indica che la prova è stata eseguita sulla faccia superiore;
- prima lettera B, indica che la prova è stata eseguita sulla faccia inferiore;
- il numero che segue è quello del provino testato;
- l'ultima lettera indica su quale porzione del provino è stata eseguita la prova (intero o porzione del travetto) . con la lettera A indica che la prova è stata eseguita in mezzeria del provino intero, B e C indicano che la prova è stata eseguita sempre in mezzeria ma su una porzione del travetto precedentemente rotto.

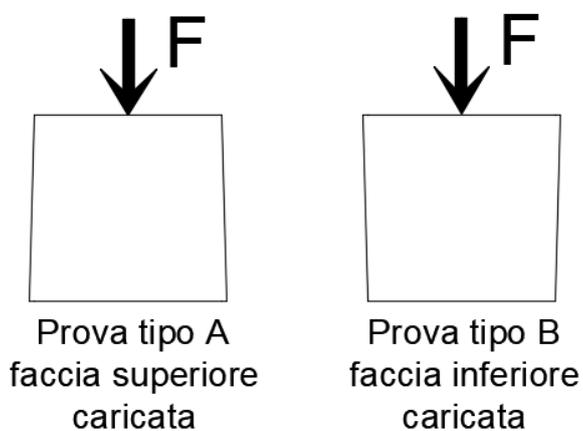


Figura 61 - Schema prova tipo A e tipo B

n°prova	σ [MPa]	ε [‰]	FORZA F [kN]	FRECCIA f [mm]	MODULO $E_{TAN,i}$ [MPa]	MODULO $E_{met\grave{a},pl}$ [MPa]	MODULO E_{rott} [MPa]
A-1A	15,17	12,34	6,52	4,99	2492	2091	1418
A-1B	15,01	9,19	6,02	3,47	2603	2326	1905
B-1C	9,88	7,03	4,25	3,09	2422	2204	1921
A-3A	14,98	9,42	6,01	3,88	2900	2533	2450
B-3B	9,42	7,95	4,05	3,51	2661	2463	2250

Figura 62 – Risultati ottenuti dalle prove distruttive in configurazione di flessione su 3 punti

dove: il termine $E_{tan,i}$ indica il modulo tangente iniziale, il termine $E_{met\grave{a},pl}$ indica il valore del modulo a circa metà ramo plastico e il termine E_{rott} indica il modulo secante al momento della rottura. Come si osserva dalla figura 62, i valori del modulo tendono via via a decrescere passando da valori di circa 2500 MPa a valori di circa 1900 MPa.

La terza e la quinta prova, indicati con la rispettiva lettera B, riguardano prove eseguite sulla faccia posteriore, che però nel nostro caso non sono da considerarsi perché il modulo verrà posizionato con la faccia superiore a contatto con i carichi. La differenza dei risultati delle prove di tipo A e di tipo B sono evidenti, confermando quindi una non perfetta omogeneità del materiale.

Infatti, nella sezione del provino, si è potuto osservare che il fresato utilizzato, durante il riscaldamento nella produzione dello stampo, ha una tendenza a precipitare per gravità verso la base inferiore e il polipropilene tende, invece, a salire verso la superficie, ottenendo così un materiale costituito da elementi separati tra di loro.

Una possibile soluzione, per evitare questo fenomeno indesiderato, risiede nel tempo del processo di stampaggio. Se i tempi diminuissero, i due materiali costituenti la miscela non avrebbero tempo di separarsi e disunirsi, formando così un materiale più compatto.

Si procede, quindi, riportando quelle che sono le sollecitazioni nelle situazioni più gravose in esame.

Per la verifica a flessione allo SLU, bisogna valutare la seguente equazione:

$$\sigma_{sd} \leq f_u$$

Nell'immagine sottostante viene riportata la distribuzione delle tensioni massime agenti sulla struttura date per un carico distribuito, sopra descritto:

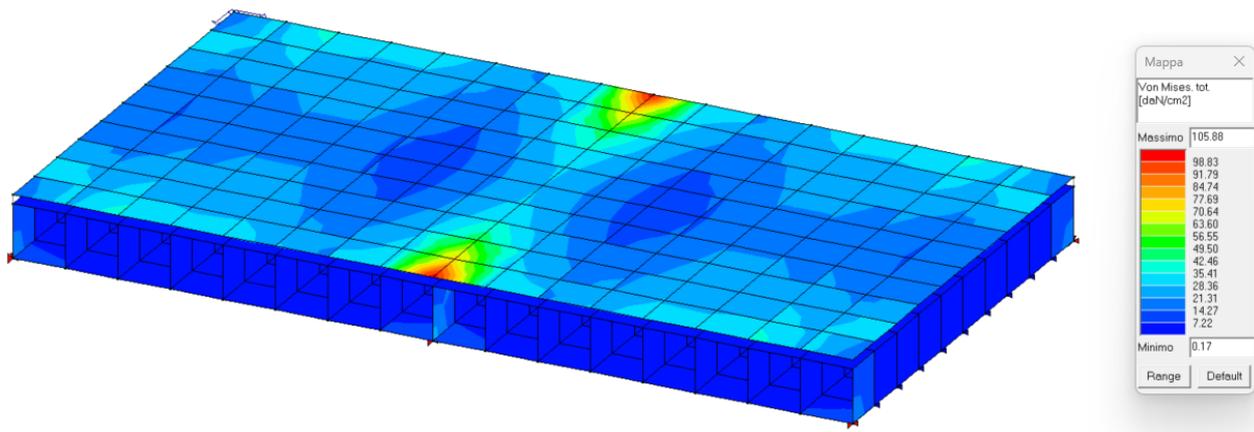


Figura 63 - Stato tensionale dato dal carico distribuito applicato

e dal carico accidentale concentrato:

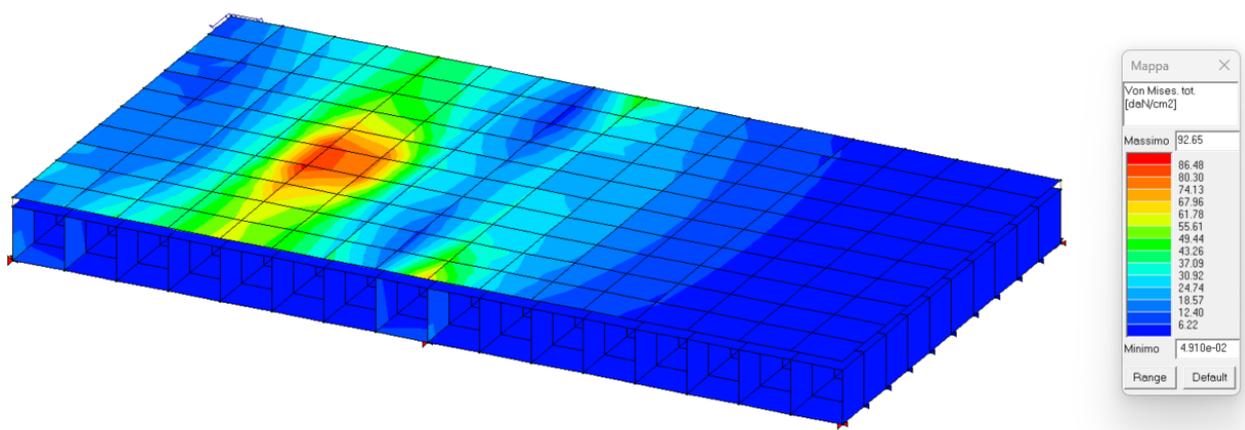


Figura 64 - Stato tensionale dato dal carico puntuale applicato

Il valore della massima tensione sollecitante vale quindi:

$$\sigma_{sd} = 10,1 \leq f_u = 15,2 \text{ MPa}$$

La verifica è pienamente soddisfatta, andando a considerare le tensioni in esame. Inoltre, per rimanere in una condizione di maggior sicurezza, si potrebbe considerare la resistenza della miscela innovativa ridotta di un fattore maggiore di uno. Essendo il materiale di nuova ideazione, sulla norma non viene specificato il valore di tale coefficiente, ed essendo prodotto in

fabbrica con una procedura standardizzata e con errori ridotti al minimo, si può considerare un valore non troppo elevato. Se si vuole considerare la condizione peggiore, si potrebbe considerare il caso del calcestruzzo con un valore riduttivo pari a 1,5, e, in tal caso, l'equazione della verifica risulterebbe comunque soddisfatta.

Per la verifica allo stato limite d'esercizio non viene specificata nella normativa un valore limite della freccia o di ϵ , ma è importante valutare la deformabilità (espressa sotto forma di spostamento dei nodi) per la somma dei carichi distribuiti:

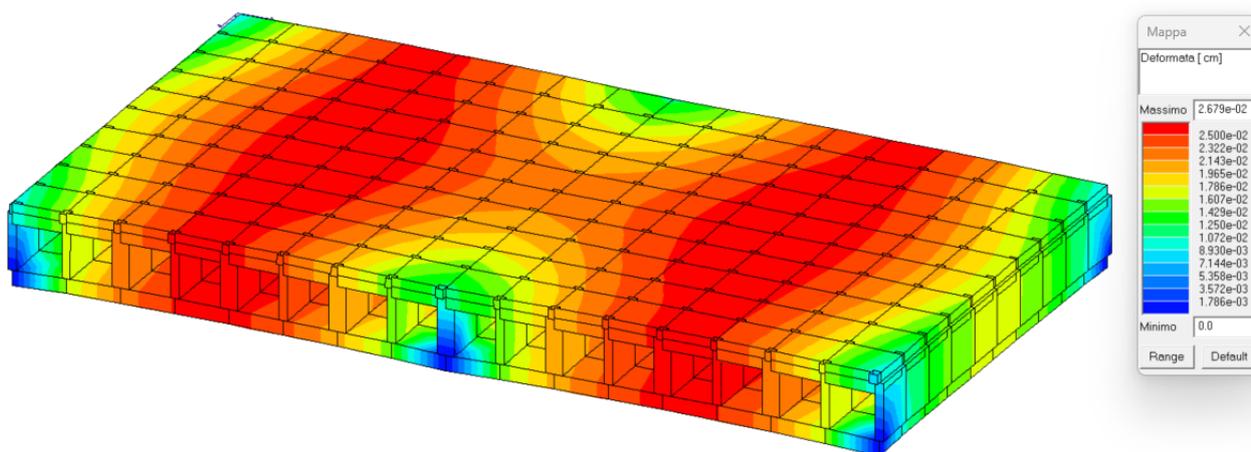


Figura 65 - Stato deformativo dato dal carico distribuito applicato

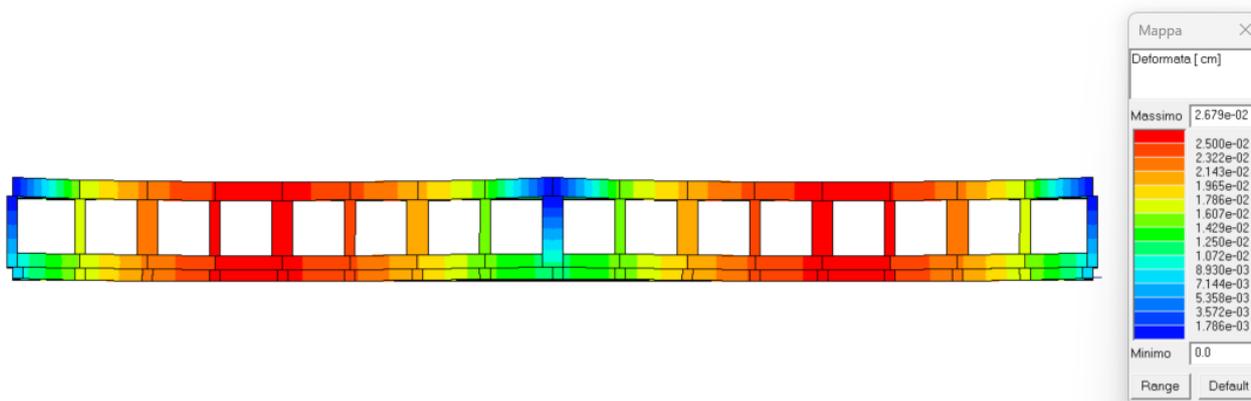


Figura 66 - Vista frontale struttura

E la deformabilità dovuta al carico puntuale:

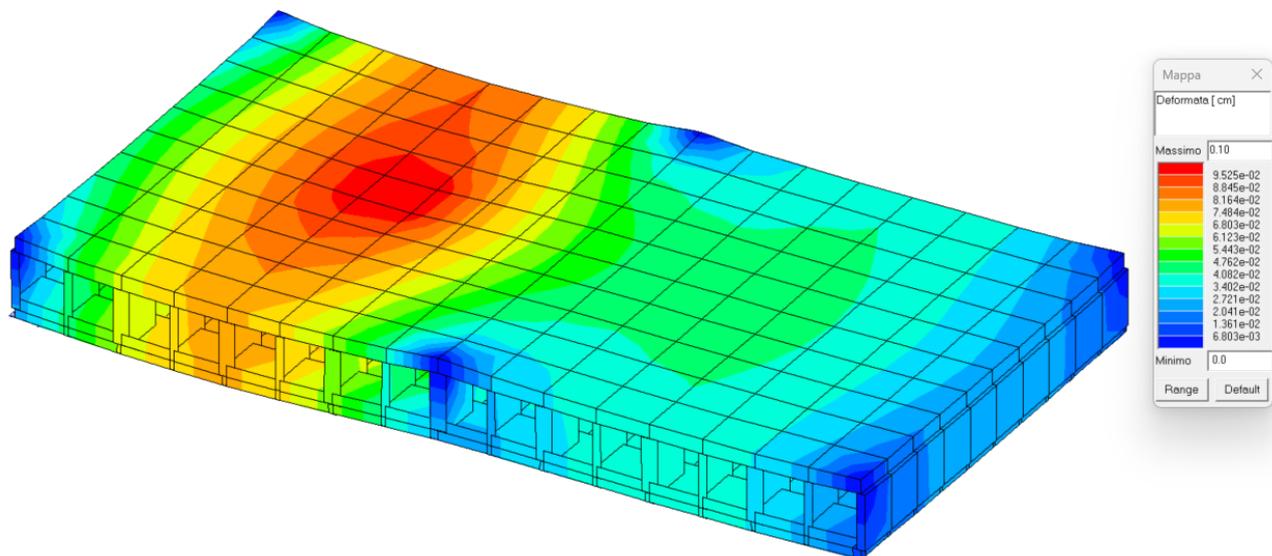


Figura 67 - Stato deformativo dato dal carico puntuale applicato

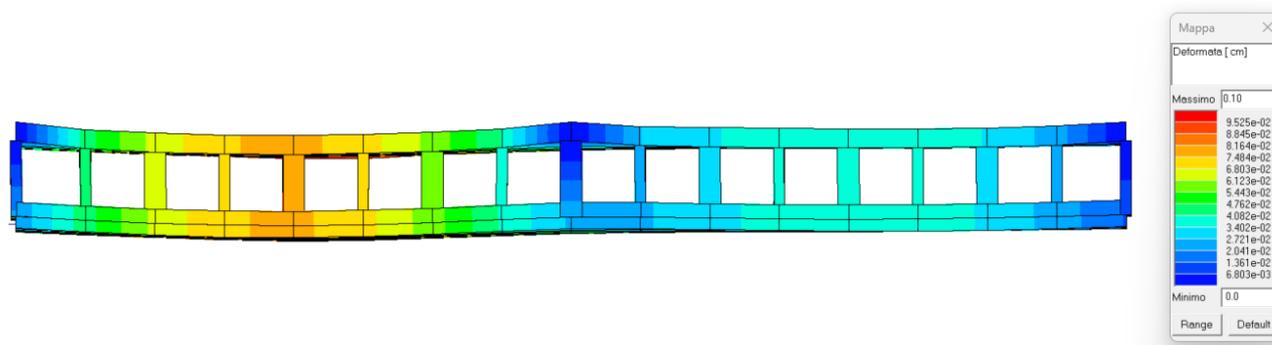


Figura 68 - Vista frontale struttura

Andando a osservare i grafici ottenuti nelle prove precedenti, si osservano i limiti del campo elastico e del campo plastico del materiale. Con questi dati si può asserire che fino a una deformazione di circa 1,7 mm, la struttura rimane nel campo di deformabilità elastico e, quindi, in grado di restituire l'energia accumulata ritornando nelle condizioni iniziali e non subendo deformazioni permanenti.

Il massimo valore della deformazione, ottenuto attraverso l'analisi del software di calcolo, risulta di 1mm, e perciò è compatibile con le funzionalità della struttura.

7. Conclusioni

Alla fine dell'analisi, si può riassumere l'iter a cui è stato sottoposto il progetto della pista ciclabile. Una volta dettagliate le esigenze strutturali, si è proceduto a scegliere in modo molto meticoloso i materiali per la costruzione, cercando la miscela che più soddisfa la previsione d'uso della pista ciclabile. Definita la miscela, è stato importante modellare la struttura che presenta risposte incoraggianti e semplicità di utilizzo.

Il modello prefabbricato costituito da una miscela di materiali di secondo impiego fresato (RAP) e plastica (polipropilene), ha risposto in modo soddisfacente alle verifiche richieste, andando a confermare la possibilità di realizzare nel comune di Alba il tratto di pista ciclopeditonale.

In questo lavoro siamo partiti da analizzare tre problematiche fondamentali per l'inizio del millennio. Innanzitutto, la creazione di un'economia circolare, capace di trasformare i rifiuti in prodotti aventi le stesse caratteristiche delle materie prime. In secondo luogo, l'utilizzo degli stessi per il benessere e il cambiamento di mentalità di un'intera comunità. Come terzo problema, l'utilizzo dell'energia in modo veramente ecosostenibile e intelligente.

Abbiamo partecipato alla trasformazione di materiali molto inquinanti, come la plastica e pericolosi come il conglomerato bituminoso, in pavimentazioni stradali di nuova concezione. Persino le normative vigenti sono state implementate per ottenere i risultati relativi alle prove di rigidità e a fatica, mostrando un prodotto che ben risponde alle caratteristiche richieste per l'intero progetto.

È stata analizzata anche la modalità di formazione dei blocchi prefabbricati, cercando la forma più semplice al bisogno di una via percorribile da pedoni e biciclette. Il risultato ottenuto è proprio corrispondente alle aspettative e ben dimostra che materiali di rifiuto possono ridiventare preziosi elementi per la costruzione.

Il progetto di una pista ciclabile, anche se per il momento ancora in fase di prototipo, interessa l'intera comunità sotto due aspetti. Per quanto detto prima, alleggerisce, sicuramente, il carico dei rifiuti da smaltire e d'altro canto stimola l'intera popolazione ad usare forme intelligenti e, anche, umanamente stimolanti di trasporto.

Sul fronte dell'energia, la soluzione prefabbricata con materiali sostenibili risparmia le materie sia all'inizio della realizzazione dell'opera e anche durante le fasi di manutenzione ordinaria della via ciclabile, limitando al minimo gli interventi di sostituzione o riparazione di elementi prefabbricati.

In questo lavoro si è cercato di dimostrare che una progettazione intelligente insieme a una collaborazione tra enti locali e privati può rispondere ai quesiti che il nostro pianeta ormai non può più continuare a disattendere.

Certo, è ancora una piccola goccia al bisogno sconfinato di riprendersi cura di tutto il globo terrestre, ma, sicuramente, è già un primo passo che può essere imitato perché dimostrato che è possibile interrompere quel trend negativo che da troppo tempo è stato intrapreso.

Il contributo che l'ingegneria può apportare, utilizzando anche le più moderne tecnologie, alla vita di un centro urbano è notevole, perché mette in risalto le problematiche e riesce a creare quelle sinergie utili a rispondervi.

Partecipare a un progetto di tale portata contribuisce a stimolare il lavoro di molte persone a continuare su questa strada, che è vista ora come una reale possibilità.

Infatti, con una struttura formata con materiali di scarto presenti in tutto il territorio, non sarà un problema il reperimento delle risorse e, anzi, sarà l'occasione perfetta per smaltire grandi quantità di rifiuti. Inoltre, la semplicità della posa e della costruzione della pista, invoglierà le amministrazioni locali a riprodurre questo sistema, poiché in modo pratico e celere si possono creare nuovi percorsi sempre più green e innovativi, che porteranno a un risparmio energetico e a una riduzione delle emissioni, riducendo il traffico e garantendo una valida alternativa al cittadino.

Infatti, il modello si presta a essere un prototipo di un futuro modo di costruire i percorsi che collegano il cittadino con l'ambiente, e potrebbe essere il punto di partenza per la costruzioni di altri percorsi con altre esigenze e caratteristiche, come i ponti pedonali o tratti stradali a traffico ridotto.

Quindi, in poche parole, la nuova pista ECOSMARTROAD 2.0 potrà prendere piede in ogni città o paese, con la speranza di ridurre l'impatto ambientale per garantire a tutto il mondo un futuro migliore.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- economyup.it, <http://bitly.ws/Eh7z>, 10/03/2023 (ultima consultazione).
- Censis, rapporto 2018 “*La sfida della plastica: una gestione intelligente per un materiale intelligente*”, 10/03/2023 (ultima consultazione), FILE PDF.
- Comune di Follonica, <http://bitly.ws/Eh89>, 15/03/2023 (ultimo aggiornamento).
- Regione Toscana, <http://bitly.ws/Eh8p>, [allegato](#) A.b.10 15/03/2023 (ultimo aggiornamento).
- Sciencedirect.com, <http://bitly.ws/Eh99>, “a review of recycled aggregate in concrete applications (from 2000 to 2017)”, 16/03/2023 (ultimo aggiornamento).
- Beatrice Costa, <https://www.polito.it/corsi-di-laurea/architettura>, “gestione rifiuti urbani tra Amsterdam e Torino”, dipartimento di Architettura e Design, 17/03/2023.
- Nelcuoredelpaese.it, <http://bitly.ws/Eh9D>, 20/03/2023 (ultimo aggiornamento).
- ba.camcom.it, <http://bitly.ws/Eh9W>, atti convegno “smart city SudItaly”, 20/03/2023 (ultima consultazione).
- TeMA Journal, <http://bitly.ws/Eham>, “*Mobilità Urbana Sostenibile: strategie attuali e nuove sfide per le città europee.*”, 25/03/2023 (ultima consultazione).
- geoconsultingitalia.com, <http://bitly.ws/Ehbv>, metodi di riciclaggio del fresato, 30/03/2023 (ultima consultazione).
- Stradeeautostrade.it, <http://bitly.ws/Ehc4>, 27/03/2023 (ultima consultazione).
- Stradeeautostrade.it, <http://bitly.ws/Ehcg>, 27/03/2023 (ultima consultazione).
- Stradeeautostrade.it, <http://bitly.ws/Ehcp>, 27/03/2023 (ultima consultazione).
- Bermoplast.com, <http://bitly.ws/EkYJ>, 27/03/2023 (ultima consultazione).
- Materieplastiche.eu, <http://bitly.ws/EkYu>, 22/02/2023 (ultima consultazione).
- corepla.it, <http://bitly.ws/EkYp>, 20/02/2023, (ultima consultazione).
- Epiemon onitalia.com, <http://bitly.ws/EkYh>, 02/04/2023 (ultima consultazione).
- istat.it, <https://www.istat.it/it/archivio/traffico>, 24/03/2023 (ultima consultazione).
- Regioneapiemonte.it, <http://bitly.ws/EkX3>, 26/03/2023 (ultima consultazione).
- Comune.alba.cn.it, <http://bitly.ws/EkXz>, 20/03/2023 (ultima consultazione).
- Plastic Road.eu, <https://plasticroad.com/>, 05/04/2023 (ultima consultazione).
- Wirgen-group.com, <http://bitly.ws/EkXQ>, 27/03/2023 (ultima consultazione).
- Uni.com, UNI EN 12697-24-2018, 07/05/2023 (ultima consultazione).

- Uni.com, UNI EN 12697-26-2018, 07/05/2023 (ultima consultazione).
- Uni.com, UNI EN 13108-1, 07/05/2023 (ultima consultazione).
- Ecf.com, EuropeanCyclistFederation <https://ecf.com>, 03/06/2023 (ultima consultazione)
- Commissione.europea.com, <http://bitly.ws/GQni>, 18/04/2023 (ultima consultazione)

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Grafico percentuali di utilizzatori bicicletta.....	4
Figura 2 - Planimetria sito.....	7
Figura 3 - Vista lato strada sito in esame	8
Figura 4 - Modello Plastic Road.....	12
Figura 5 - Macchina fresatrice	16
Figura 6 - Treno di riciclaggio	19
Figura 7 - Disposizione gruppo metilico	25
Figura 8 - Configurazioni stereochimiche.....	26
Figura 9 - Sezione 1 Provino prismatico costituito da fresato (RAP) e Polipropilene (PP).....	30
Figura 10 - Sezione 2 provino prismatico costituito da fresato (RAP) e Polipropilene (PP).....	30
Figura 11 - Dimensioni Provino	31
Figura 12 - Vista dall'alto dei travetti prismatici	32
Figura 13 - Vista della parte inferiore dei travetti prismatici	32
Figura 14 - Spessori per garantire in fissaggio del provino per l'esecuzione della prova 4PB	33
Figura 15 - Macchinario utilizzato al Politecnico di Torino per l'esecuzione delle prove.....	34
Figura 16 - Particolare 1, Bombola ad aria compressa	35
Figura 17 - Particolare 2, Valvola aria compressa	35
Figura 18 - Acquisitore dati.....	36
Figura 19 - Accessorio per Four Point Bending Test	36
Figura 20 - Posizionamento provino nella macchina	37
Figura 21 - Modello della prova	43
Figura 22 - Andamento del Modulo E^* (deformazione applicata, μs ; a 5,20, 40°C) a frequenze di esercizio della pista.....	47
Figura 23 - Andamento del Modulo E^* (Temperatura, °C; a 50,100, 150 μs) a frequenze di esercizio della pista.....	48
Figura 24 - Schema prova a fatica	51

Figura 25 - Andamento del modulo all'aumentare del numero di cicli	54
Figura 26 - Sezione della struttura	55
Figura 27 - Dettaglio Cordolo, terreno e bullone	56
Figura 28 - Schema della sovrastruttura	56
Figura 29 - Sezione Piastra di chiusura e sella (o base d'appoggio)	57
Figura 30 - Elemento singolo quotato	58
Figura 31 – Fresato pezzatura 0/14 mm	61
Figura 32 - Fresato pezzatura 0/22,4 mm	61
Figura 33 - Fresato pezzatura 0/4 mm	62
Figura 34 - Stampo Travetto, parte mobile e parte fissa	63
Figura 35 - Stampo Travetto completo	63
Figura 36 – Immagine reale dello stampo	64
Figura 37 – Immagine dei Travetti post-stampo	64
Figura 38 - Stampo Piastra, parte mobile e parte fissa	65
Figura 39 - Stampo piastra completo	65
Figura 40 – Immagine dello stampo per realizzare la piastra	66
Figura 41 – Immagine della Piastra post-stampo	66
Figura 42- Immagine del Modulo prefabbricato (4 travetti e una piastra)	67
Figura 43 - Dettaglio1 del modulo prefabbricato	67
Figura 44 - Dettaglio 2 del modulo prefabbricato	68
Figura 45 - Parte inferiore del pannello (visione dei 4 bulloni di serraggio)	68
Figura 46 - Rugosità della superficie lavorata	69
Figura 47 - Macchinario per l'esecuzione delle prove di Skid test	71
Figura 48 – Caratteristiche “strain gauge”	72
Figura 49 . Schema della struttura della connessione tra i sensori	73
Figura 50 - Immagine interfaccia Software e schema dei nodi della struttura	74
Figura 51 - Schema 3D struttura	75
Figura 52 - Schematizzazione carico folla da normativa	81
Figura 53 - Estratto NTC carico neve	82
Figura 54 - Schema prova flessione su tre punti	85
Figura 55 – Immagine del macchinario prova di flessione su tre punti	86
Figura 56 - Particolare provino prova flessione su tre punti	87

Figura 57 - Diagramma carico-freccia	88
Figura 58 - Diagramma sforzo deformazione	89
Figura 59 - Misura della deformazione locale nel punto di contatto del carico.....	90
Figura 60 – Deformazione locale dovuta alla forza puntuale applicata dalla macchina	90
Figura 61 - Schema prova tipo A e tipo B.....	91
Figura 62 – Risultati ottenuti dalle prove distruttive in configurazione di flessione su 3 punti	92
Figura 63 - Stato tensionale dato dal carico distribuito applicato	93
Figura 64 - Stato tensionale dato dal carico puntuale applicato	93
Figura 65 - Stato deformativo dato dal carico distribuito applicato.....	94
Figura 66 - Vista frontale struttura	94
Figura 67 - Stato deformativo dato dal carico puntuale applicato.....	95
Figura 68 - Vista frontale struttura	95

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Quantitativo limite elementi pericolosi	14
Tabella 2 - Limiti di concentrazione di elementi estranei	15
Tabella 3 - Diagramma sforzo-deformazione di tre polimeri diversi	23
Tabella 4 - Influenza temperatura sul comportamento dei Polimeri	24
Tabella 5 - Configurazioni di carico in base al provino	42
Tabella 6 –Modulo E* (deformazione, □s; a 5°C)	45
Tabella 7 - Modulo E* (deformazione, □s; a 20°C)	45
Tabella 8 - Modulo E* (deformazione, □s; a 40°C)	45
Tabella 9 - Andamento del Modulo E* (deformazione, □s; °T)	46
Tabella 10 - Modulo E* (deformazione applicata, □s; a 5°C), a frequenze di esercizio della pista	46
Tabella 11 - Modulo E* (deformazione applicata, □s; a 20°C), a frequenze di esercizio della pista	47
Tabella 12 - Modulo E* (deformazione applicata, □s; a 40°C), a frequenze di esercizio della pista	47
Tabella 16 - Prima classificazione a fatica	52
Tabella 17 - Seconda classificazione a fatica	53
Tabella 18 - Curva granulometria del fresato	59
Tabella 19 - Curva granulometria del fresato dopo l'estrazione del bitume	60
Tabella 20 - Analisi Skid test provini	70
Tabella 21 - Coefficienti correttivi per ogni T	70
Tabella 22 - Parametri software	76
Tabella 23 - Parametri geometrici link rigidi	76
Tabella 24 - Legenda software	77
Tabella 25 - Sistema di riferimento software	77
Tabella 26 - Specifiche nodi	77
Tabella 27- Sollecitazioni elementi shell	78
Tabella 28 - Specifiche elementi	78
Tabella 29 - Specifiche materiali	79
Tabella 30 - Note materiali	79
Tabella 31- Coefficienti g	84

Tabella 32 - Coefficienti Y	84
Tabella 33 – Valutazione della correzione della freccia per le prove di flessione su 3 punti	91

ALLEGATI ALLA TESI
(prove di laboratorio)

ALLEGATO 1

-MISURAZIONI GEOMETRICHE E CARATTERISTICHE PROVINO 1

Dimensioni geometriche:

$B = 42.5 \text{ mm};$

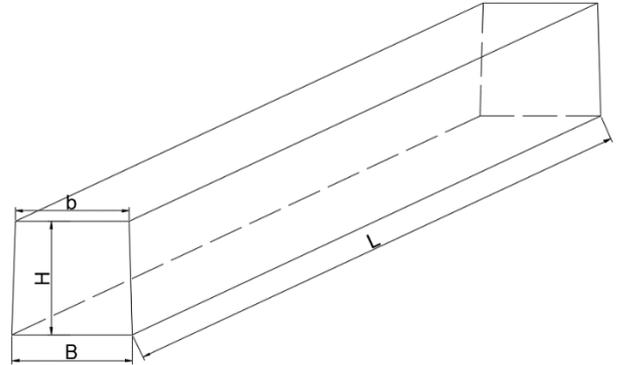
$b = 39.4 \text{ mm};$

$H = 40.2 \text{ mm};$

$L = 392 \text{ mm};$

$A_{\text{sezione}} = 1646.2 \text{ mm}^2;$

$V = 645306.5 \text{ cc};$



$M = 0.5444 \text{ kg};$

Densità = $843.6 \text{ kg/m}^3;$

-MISURAZIONI GEOMETRICHE E CARATTERISTICHE PROVINO 3

Dimensioni geometriche:

$B = 41.65 \text{ mm};$

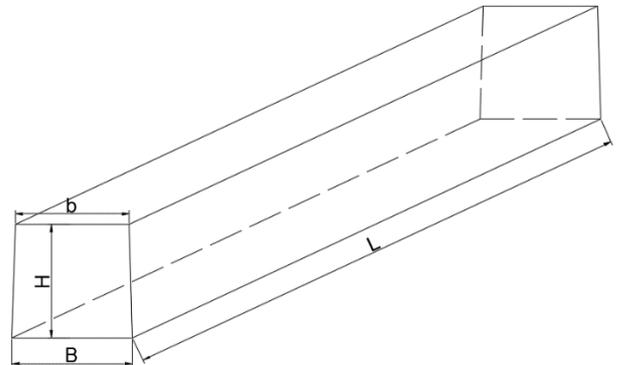
$b = 39.5 \text{ mm};$

$H = 39.45 \text{ mm};$

$L = 394 \text{ mm};$

$A_{\text{sezione}} = 1610.5 \text{ mm}^2;$

$V = 634555.2 \text{ cc};$



$M = 0.5353 \text{ kg};$

Densità = $843.6 \text{ kg/m}^3;$

ALLEGATO 2

-PROVE PER LA VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA PROVINO 3

NORMATIVA utilizzata: UNI EN 12697-26

Tempo di condizionamento del provino prima della prova: 6 h

Caratteristiche provino:

B= 41.65 mm;

b= 39.5 mm;

H= 39.45 mm;

L= 394 mm;

$A_{\text{sezione}} = 1610.5 \text{ mm}^2$;

V= 634555.2 cc;

M= 0.5353 kg;

Densità= 843.6 kg/m³;

S3 T=5 °C $\mu\epsilon=50$							
f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1082	307	1125	15,8	10	0,033
0,2	20	1558	5	1558	0,2	14	0,034
0,5	35	1503	7	1503	0,3	13	0,033
1	55	-1619	46	1620	-1,6	15	0,035
2	105	1976	144	1981	4,2	19	0,036
5	205	-1682	17	1682	-0,6	16	0,036
10	315	1890	409	1934	12,2	17	0,034
20	435	2007	366	2040	10,3	19	0,034
0,1	445	1823	295	1847	9,2	17	0,034

S3 T=5 °C $\mu\epsilon=100$							
f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	-1482	23	1483	-0,9	26	0,067
0,2	20	-1550	539	1641	-19,2	29	0,068
0,5	35	-1514	143	1521	-5,4	28	0,07
1	55	-1705	92	1708	-3,1	31	0,068
2	105	-1823	48	1823	-1,5	33	0,069
5	205	-1942	10	1942	-0,3	35	0,068
10	315	-1508	69	1510	-2,6	27	0,068
20	435	1774	521	1849	16,4	33	0,068
0,1	445	-1496	270	1520	-10,2	28	0,069

S3 T=5 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	-1428	60	1429	-2,4	38	0,102
0,2	20	-1688	51	1689	-1,7	45	0,102
0,5	35	-1556	107	1560	-3,9	42	0,102
1	55	-1659	165	1667	-5,7	43	0,098
2	105	-1613	198	1625	-7	43	0,1
5	205	-1846	6	1846	-0,2	50	0,103
10	315	-1561	80	1563	-2,9	42	0,102
20	435	1618	677	1754	22,7	47	0,103
0,1	445	-1546	64	1547	-2,4	42	0,103

S3 T=20 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1515	289	1542	10,8	13	0,033
0,2	20	1522	598	1635	21,4	14	0,033
0,5	35	1667	27	1667	0,9	15	0,034
1	55	1638	96	1641	3,3	13	0,031
2	105	1754	20	1754	0,7	16	0,035
5	205	1795	120	1799	3,8	16	0,034
10	315	1716	400	1762	13,1	16	0,034
20	435	2275	727	2388	17,7	21	0,034
0,1	445	-1542	7	1542	-0,3	13	0,033

S3 T=20 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1514	248	1534	9,3	27	0,067
0,2	20	-1575	1	1575	0	28	0,067
0,5	35	1628	34	1628	1,2	29	0,069
1	55	1648	87	1650	3	30	0,068
2	105	1661	57	1662	2	29	0,068
5	205	1668	111	1671	3,8	30	0,068
10	315	1647	260	1667	9	30	0,069
20	435	1322	1319	1868	44,9	33	0,068
0,1	445	1540	41	1540	1,5	27	0,068

S3 T=20 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1517	172	1527	6,5	40	0,101
0,2	20	1580	40	1580	1,5	42	0,101
0,5	35	1596	55	1597	2	42	0,101
1	55	1633	31	1633	1,1	43	0,101
2	105	1660	56	1661	1,9	44	0,103
5	205	1711	86	1713	2,9	46	0,102
10	315	1580	253	1601	9,1	42	0,102
20	435	1700	53	1701	1,8	45	0,103
0,1	445	1519	202	1532	7,6	40	0,101

S3 T=40 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1090	379	1154	19,2	10	0,034
0,2	20	1306	65	1308	2,9	11	0,034
0,5	35	1310	88	1313	3,8	11	0,034
1	55	1229	34	1229	1,6	11	0,034
2	105	1492	166	1501	6,4	11	0,028
5	205	1408	264	1433	10,6	13	0,034
10	315	-1343	77	1346	-3,3	12	0,034
20	435	1157	1437	1873	51,8	17	0,035
0,1	445	1237	214	1256	9,8	11	0,034

S3 T=40 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1188	367	1243	17,2	22	0,068
0,2	20	1265	338	1309	14,9	23	0,068
0,5	35	1252	53	1253	2,4	22	0,068
1	55	1368	173	1378	7,2	25	0,07
2	105	1320	200	1336	8,6	23	0,066
5	205	1365	266	1391	11	25	0,068
10	315	1255	181	1268	8,2	22	0,068
20	435	1234	1218	1733	44,6	31	0,068
0,1	445	1160	332	1206	16	21	0,068

S3 T=40 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	10	1188	194	1204	9,3	32	0,101
0,2	20	1231	321	1272	14,6	34	0,102
0,5	35	1233	401	1296	18	34	0,102
1	55	1321	197	1335	8,5	34	0,097
2	105	1314	232	1334	10	36	0,103
5	205	1322	347	1367	14,7	36	0,102
10	315	1301	352	1348	15,1	36	0,103
20	435	1001	1097	1485	47,6	40	0,103
0,1	445	1166	284	1200	13,7	32	0,102

-PROVE PER LA VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA PROVINO 2

Tempo di condizionamento del provino prima della prova: 4 h

Caratteristiche provino:

B= 40.8 mm;

b= 39.5 mm;

H= 39.2 mm;

L= 395.75 mm;

$A_{\text{sezione}} = 1597.0 \text{ mm}^2$;

V= 632032.5 cc;

M= 0.5810 kg;

Densità= 919.3 kg/m³;

S2 T=5 °C $\mu\epsilon=50$							
f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	2271	107	2274	2,7	20	0,034
0,2	40	2268	171	2274	4,3	20	0,034
0,5	60	2319	122	2322	3	20	0,034
1	110	2415	65	2416	1,5	21	0,034
2	190	2426	138	2430	3,3	21	0,034
5	290	2473	189	2480	4,4	22	0,034
10	400	2499	81	2500	1,9	21	0,034
20	520	2360	436	2400	10,5	19	0,034
0,1	540	2261	72	2262	1,8	20	0,034

S2 T=5 °C $\mu\epsilon=100$							
f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	2187	120	2190	3,1	38	0,068
0,2	40	2227	114	2230	2,9	39	0,068
0,5	60	2303	116	2306	2,9	40	0,068
1	110	2335	82	2336	2	41	0,068
2	190	2382	81	2384	1,9	42	0,068
5	290	2423	115	2426	2,7	42	0,068
10	400	2423	201	2432	4,7	42	0,068
20	520	2270	618	2353	15,2	37	0,068
0,1	540	2197	135	2202	3,5	39	0,068

S2 T=5 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	2167	100	2169	2,6	57	0,103
0,2	40	2197	97	2199	2,5	58	0,103
0,5	60	2258	95	2260	2,4	60	0,103
1	110	2301	61	2302	1,5	61	0,103
2	190	2343	113	2346	2,8	62	0,103
5	290	2393	111	2395	2,7	63	0,103
10	400	2417	124	2420	2,9	62	0,103
20	520	2149	604	2232	15,7	52	0,103
0,1	540	2152	90	2154	2,4	57	0,103

S2 T=20 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1838	11	1838	0,3	16	0,034
0,2	40	1864	49	1864	1,5	16	0,034
0,5	60	1921	60	1922	1,8	17	0,034
1	110	-1942	5	1942	-0,2	17	0,034
2	190	2007	77	2008	2,2	18	0,034
5	290	2005	81	2006	2,3	18	0,034
10	400	2014	118	2017	3,3	17	0,034
20	520	1816	396	1858	12,3	14	0,034
0,1	540	1757	67	1758	2,2	15	0,034

S2 T=20 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1735	67	1736	2,2	30	0,068
0,2	40	1775	67	1776	2,2	31	0,068
0,5	60	1805	76	1806	2,4	32	0,068
1	110	1851	91	1853	2,8	33	0,068
2	190	1875	61	1876	1,9	33	0,068
5	290	1897	86	1899	2,6	33	0,068
10	400	1951	18	1951	0,5	33	0,068
20	520	1821	552	1903	16,9	29	0,068
0,1	540	1737	51	1738	1,7	31	0,068

S2 T=20 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1680	105	1683	3,6	44	0,103
0,2	40	1715	93	1717	3,1	45	0,103
0,5	60	1753	76	1755	2,5	46	0,103
1	110	1801	77	1802	2,4	47	0,103
2	190	1818	94	1820	3	48	0,103
5	290	1848	91	1850	2,8	48	0,103
10	400	1855	187	1864	5,7	48	0,103
20	520	1470	515	1557	19,3	34	0,103
0,1	540	1652	97	1655	3,4	44	0,103

S2 T=40 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1399	125	1404	5,1	12	0,034
0,2	40	1430	145	1437	5,8	13	0,034
0,5	60	1450	102	1453	4	13	0,034
1	110	1498	72	1500	2,8	13	0,034
2	190	1545	63	1546	2,4	14	0,034
5	290	1603	59	1604	2,1	14	0,034
10	400	16116	323	1648	11,3	14	0,034
20	520	818	927	1237	48,6	9	0,034
0,1	540	1306	86	1309	3,8	11	0,034

S2 T=40 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1243	102	1247	4,7	22	0,068
0,2	40	1268	103	1273	4,7	22	0,068
0,5	60	1321	107	1325	4,6	23	0,068
1	110	1344	102	1348	4,3	24	0,068
2	190	1392	62	1393	2,5	24	0,068
5	290	1462	171	1472	6,7	26	0,068
10	400	1432	180	1444	7,2	24	0,068
20	520	606	766	976	51,7	15	0,068
0,1	540	1229	111	1234	5,2	22	0,068

S2 T=40 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1194	109	1199	5,2	32	0,103
0,2	40	1226	113	1231	5,3	32	0,103
0,5	60	1273	94	1277	4,2	34	0,103
1	110	1322	116	1327	5	35	0,103
2	190	1326	102	1330	4,4	35	0,103
5	290	1382	108	1387	4,5	36	0,103
10	400	1340	180	1352	7,7	34	0,103
20	520	534	719	896	53,4	20	0,103
0,1	540	1171	135	1179	6,6	31	0,103

-PROVE PER LA VALUTAZIONE DELLA RIGIDEZZA PROVINO 4

Tempo di condizionamento del provino prima della prova: 4 h

Caratteristiche provino:

B= 41.5 mm;

b= 40.7 mm;

H= 39.3 mm;

L= 395.25 mm;

$A_{\text{sezione}} = 1614.4 \text{ mm}^2$;

V= 638103.1 cc;

M= 0.5395 kg;

Densità= 845.5 kg/m³;

S4 T=5 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1989	85	1991	2,4	18	0,034
0,2	40	2042	7	2042	0,2	18	0,034
0,5	60	2128	73	2129	2	19	0,034
1	110	2109	53	2110	1,4	19	0,034
2	190	2176	115	2179	3	19	0,034
5	290	2172	20	2172	0,5	19	0,034
10	400	2269	112	2271	2,8	20	0,034
20	520	1958	338	1987	9,8	15	0,034
0,1	540	1940	153	1946	4,5	17	0,034

S4 T=5 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1948	118	1951	3,5	35	0,068
0,2	40	1965	81	1966	2,3	35	0,068
0,5	60	2021	71	2023	2	36	0,068
1	110	2057	104	2060	2,9	37	0,068
2	190	2092	85	2094	2,3	37	0,068
5	290	2147	88	2149	2,3	38	0,068
10	400	2217	79	2218	2,1	38	0,068
20	520	2043	123	2047	3,4	32	0,068
0,1	540	1944	66	1945	2	35	0,068

S4 T=5 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1943	97	1945	2,7	52	0,103
0,2	40	1966	79	1967	2,3	53	0,103
0,5	60	2020	81	2022	2,3	54	0,103
1	110	2068	84	2070	2,3	55	0,103
2	190	2111	97	2113	2,6	56	0,103
5	290	2156	73	2157	1,9	57	0,103
10	400	2176	115	2179	3	57	0,103
20	520	2015	228	2028	6,5	47	0,103
0,1	540	1914	101	1917	3	51	0,103

S4 T=20 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1612	7	1612	0,3	14	0,034
0,2	40	-1654	0	1654	0	15	0,034
0,5	60	1692	99	1695	3,4	15	0,034
1	110	1720	63	1722	2,1	15	0,034
2	190	1739	50	1740	1,7	15	0,034
5	290	1762	46	1763	1,5	16	0,034
10	400	1733	127	1738	4,2	15	0,034
20	520	1635	359	1674	12,4	13	0,034
0,1	540	-1593	3	1593	-0,1	14	0,034

S4 T=20 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1514	56	1515	2,1	27	0,068
0,2	40	1526	40	1527	1,5	27	0,068
0,5	60	1588	33	1589	1,2	28	0,068
1	110	1610	37	1610	1,3	29	0,068
2	190	1624	45	1625	1,6	29	0,068
5	290	1639	44	1640	1,5	29	0,068
10	400	1657	42	1657	1,4	28	0,068
20	520	1447	500	1531	19	23	0,068
0,1	540	1483	198	1497	7,6	27	0,068

S4 T=20 °C $\mu\epsilon=150$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1487	61	1488	2,4	40	0,103
0,2	40	1487	89	1490	3,4	40	0,103
0,5	60	1528	84	1530	3,1	41	0,103
1	110	1550	75	1552	2,8	41	0,103
2	190	1579	74	1581	2,7	42	0,103
5	290	1595	67	1596	2,4	42	0,103
10	400	1604	114	1609	4,1	41	0,103
20	520	1237	438	1313	19,5	28	0,103
0,1	540	1458	84	1460	3,3	39	0,103

S4 T=40 °C $\mu\epsilon=50$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1221	195	1237	9,1	11	0,034
0,2	40	1272	154	1282	6,9	11	0,034
0,5	60	1292	177	1304	7,8	12	0,034
1	110	1320	192	1334	8,3	12	0,034
2	190	1341	145	1349	6,2	12	0,034
5	290	1360	193	1374	8,1	12	0,034
10	400	1399	114	1404	4,7	12	0,034
20	520	788	896	1193	48,7	9	0,034
0,1	540	1221	128	1228	6	11	0,034

S4 T=40 °C $\mu\epsilon=100$

f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1136	124	1143	6,2	20	0,068
0,2	40	1189	75	1192	3,6	21	0,068
0,5	60	1202	107	1206	5,1	21	0,068
1	110	1227	122	1233	5,7	22	0,068
2	190	1245	86	1247	3,9	22	0,068
5	290	1256	100	1260	4,5	22	0,068
10	400	1240	150	1249	6,9	22	0,068
20	520	550	670	867	50	13	0,068
0,1	540	1106	111	1112	5,7	20	0,068

S4 T=40 °C $\mu\epsilon=150$

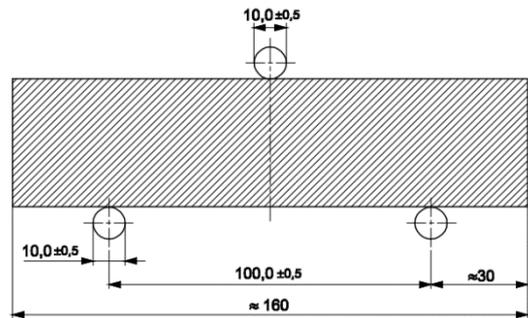
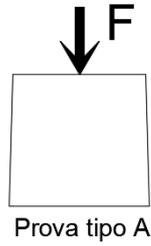
f [Hz]	N cicli	E ₁ [Mpa]	E ₂ [Mpa]	E _{comp} [Mpa]	Φ [deg]	F [N]	z [mm]
0,1	20	1090	132	1098	6,9	29	0,103
0,2	40	1110	107	1115	5,5	30	0,103
0,5	60	1149	116	1155	5,7	31	0,103
1	110	1177	126	1184	6,1	32	0,103
2	190	1206	111	1211	5,3	32	0,103
5	290	1218	112	1224	5,2	32	0,103
10	400	1207	101	1211	4,8	31	0,103
20	520	672	504	840	36,9	17	0,103
0,1	540	1103	118	1110	6,1	30	0,103

ALLEGATO 3

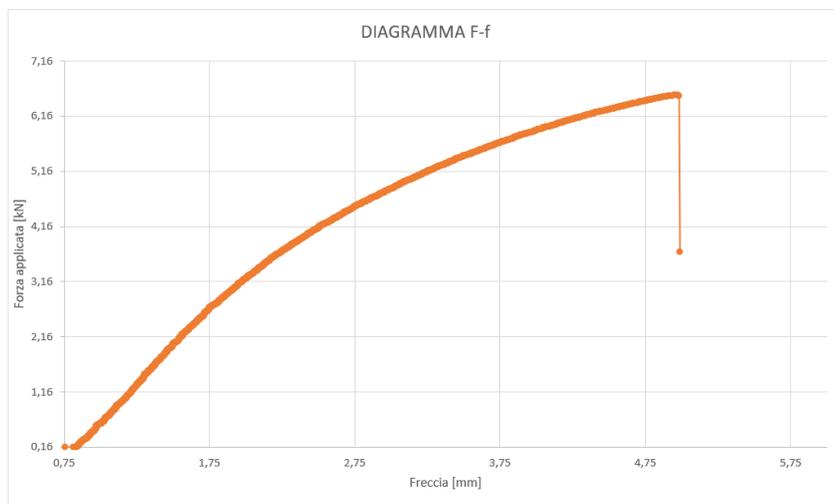
-PROVE DI FLESSIONE SU 3 PUNTI A ROTTURA

NORMATIVA impiegata: BS EN 196-1-2016

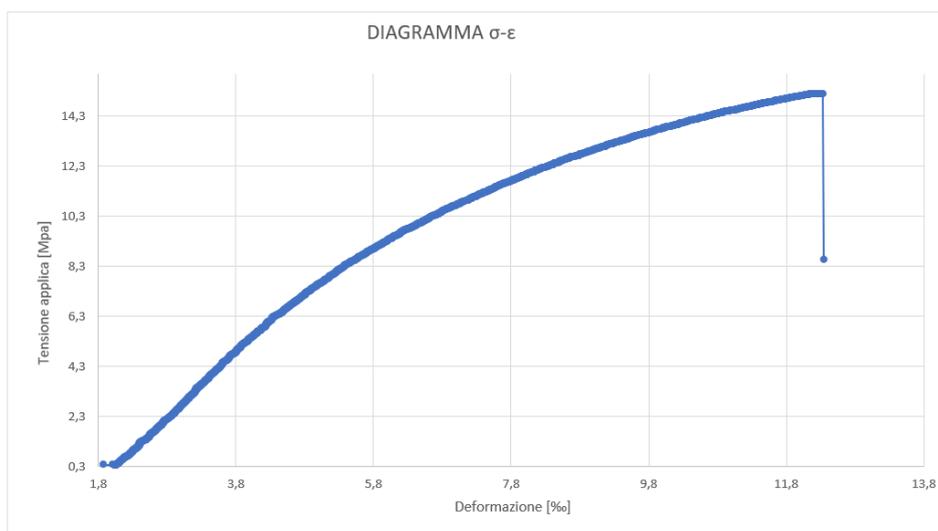
-Prova A-1A



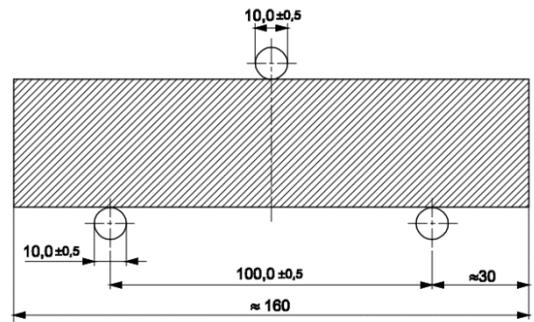
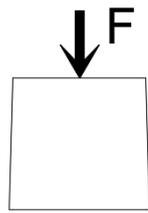
Valori ottenuti di freccia e carico:



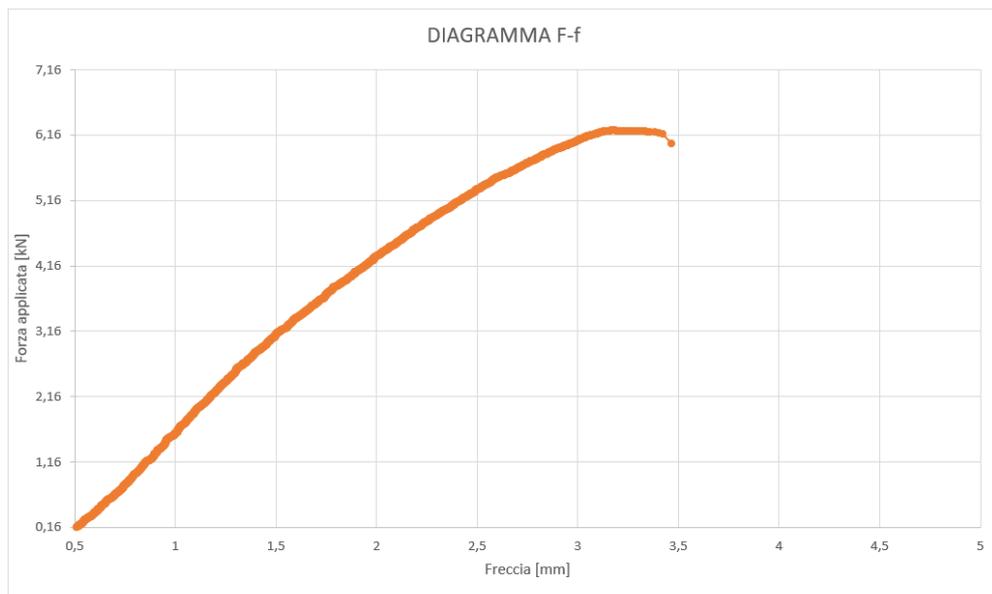
Valori di tensione e deformazione ottenuti:



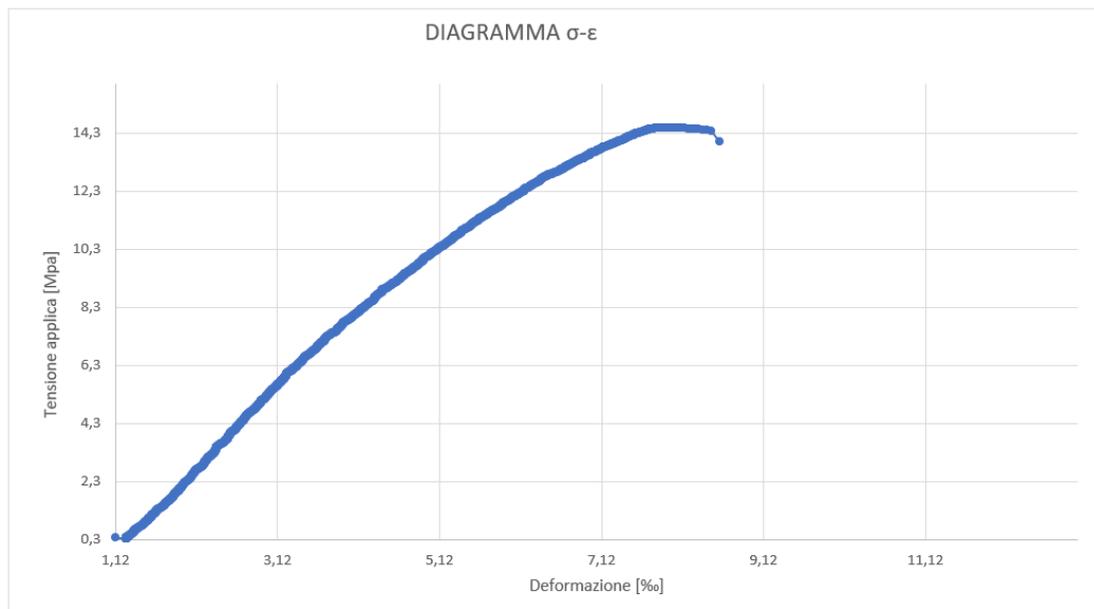
-Prova A-1B



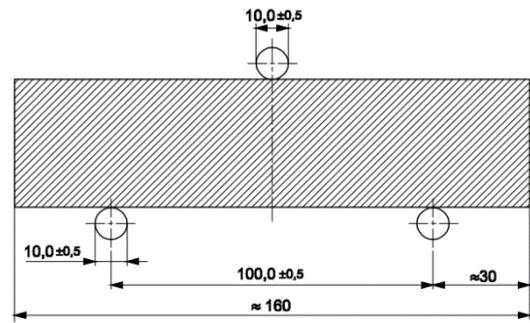
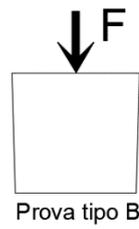
Valori ottenuti di freccia e carico:



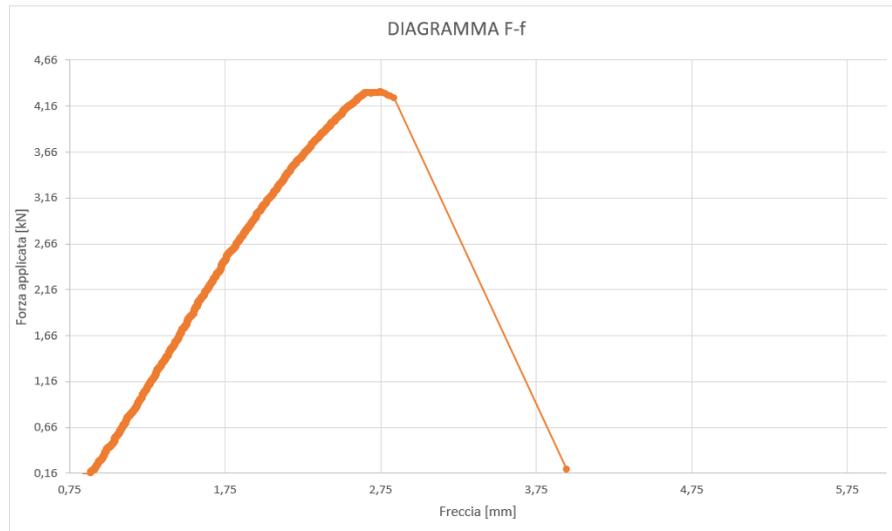
Valori di tensione e deformazione ottenuti:



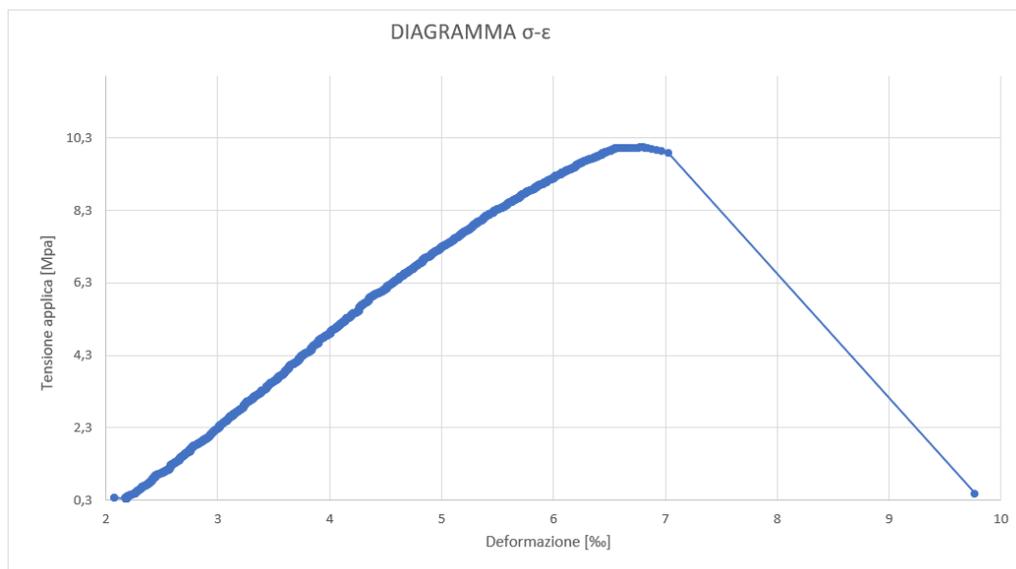
-Prova B-1C



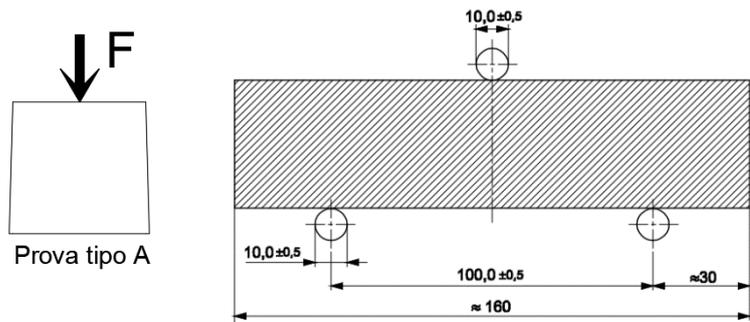
Valori ottenuti di freccia e carico:



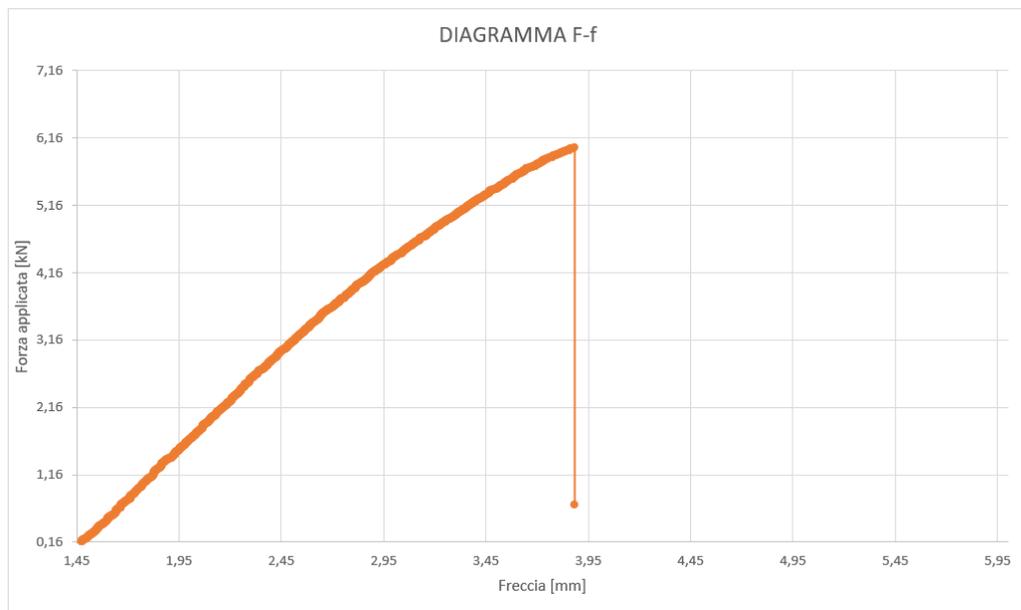
Valori di tensione e deformazione ottenuti:



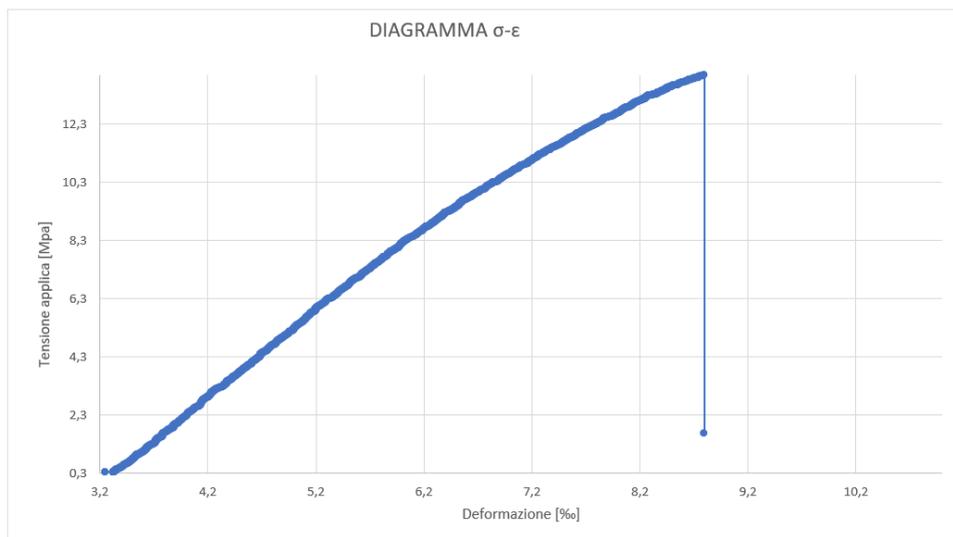
-Prova A-3A



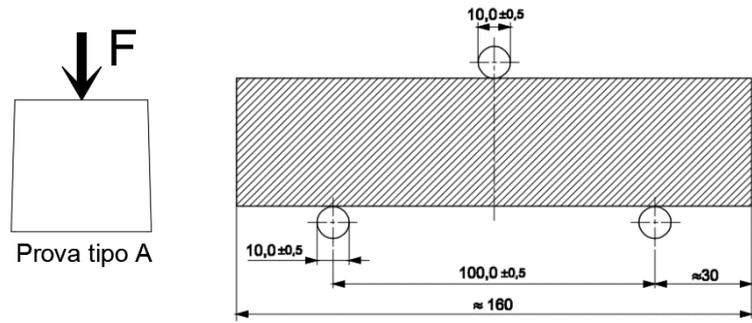
Valori ottenuti di freccia e carico:



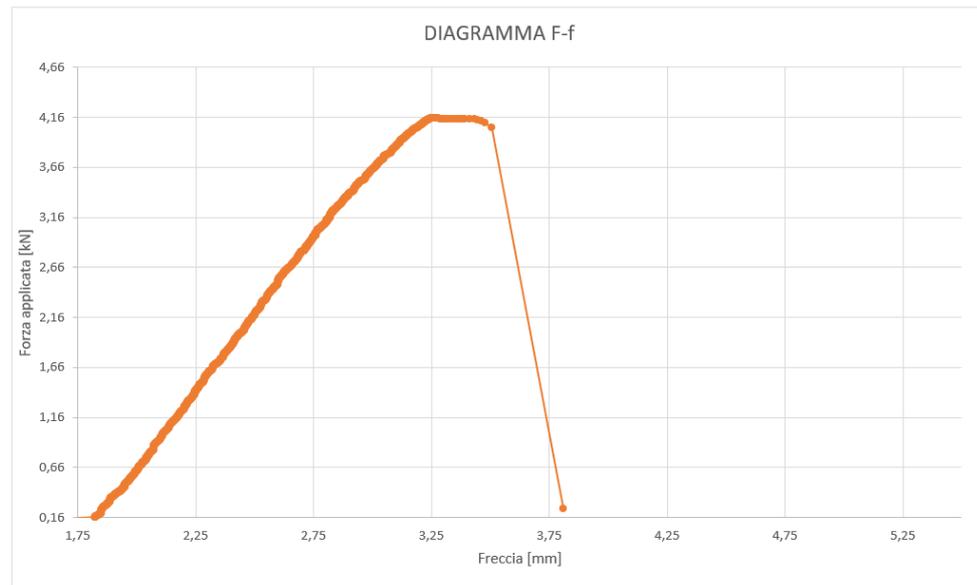
Valori di tensione e deformazione ottenuti:



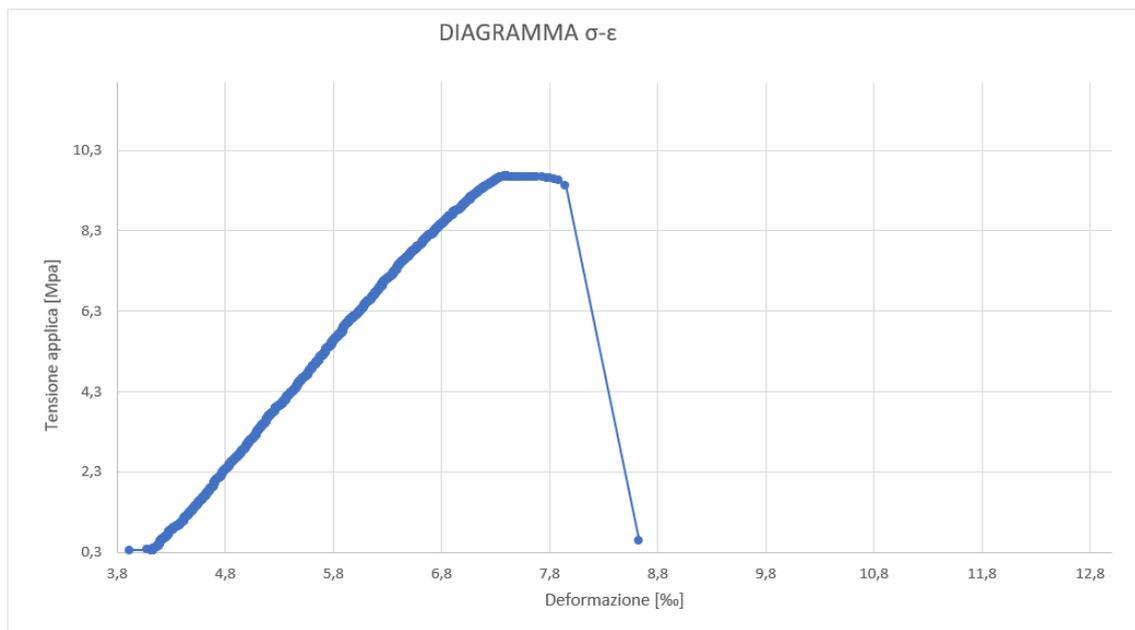
Prova B-3B



Valori ottenuti di freccia e carico:



Valori di tensione e deformazione ottenuti:



RIASSUNTO RISULTATI PROVA FLESSIONE SU 3 PUNTI

n°prova	σ [MPa]	ε [‰]	FORZA F [kN]	FRECCIA f [mm]	MODULO $E_{TAN,i}$ [MPa]	MODULO $E_{met\grave{a},pl}$ [MPa]	MODULO E_{rott} [MPa]
A-1A	15,17	12,34	6,52	4,99	2492	2091	1418
A-1B	15,01	9,19	6,02	3,47	2603	2326	1905
B-1C	9,88	7,03	4,25	3,09	2422	2204	1921
A-3A	14,98	9,42	6,01	3,88	2900	2533	2450
B-3B	9,42	7,95	4,05	3,51	2661	2463	2250