

Università Politecnica delle Marche



FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE
Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

**Impiego delle plastiche da RSU nei conglomerati
bituminosi a caldo**

Use of plastic from Municipal Solid Waste
in hot bituminous mixtures

TESI DI LAUREA DI
D'Ambrosio Giandomenico

RELATORE
Prof. Ing. Bocci Maurizio

CO-RELATORE
Ing. Prospero Emiliano

Sommario

CAPITOLO 1 – STATO DELL'ARTE

La pavimentazione stradale: funzionalità e composizione
I conglomerati bituminosi
Il bitume
Tipologie di bitume
Il degrado della pavimentazione e Manutenzione stradale
Riciclaggio per sfruttamento sostenibile delle risorse
Life Cycle Assessment (LCA)
Criteri Ambientali Minimi CAM
I rifiuti di plastica come sfida globale
Metodi impiegati per combattere i rifiuti di plastica
La sostenibilità ambientale dei processi produttivi dei conglomerati bituminosi
Vantaggi economici ed ambientali del riciclaggio delle pavimentazioni
RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)
Tecniche di riciclaggio
Utilizzo dei rifiuti di plastica nella costruzione di strade

CAPITOLO 2 – PROGRAMMA SPERIMENTALE

Obiettivi e miscele realizzate
Materiali
Plastiche
Bitume
Aggregati lapidei vergini
Apparecchiature e protocolli di prova
Curva granulometrica di progetto
Miscelazione e compattazione
Determinazione delle proprietà volumetriche
Massa volumica massima
Massa volumica apparente
Volume dei vuoti
Prova di modulo a trazione indiretta
Prova di resistenza a trazione indiretta
CT-Index
Prova di flessione semi-circolare (SCB)
Estrazione del bitume

CAPITOLO 3 – RISULTATI SPERIMENTALI

Osservazioni dopo il primo impasto
Influenza della tipologia di plastica
Influenza del dosaggio di plastica
Influenza del contenuto di bitume
Influenza della temperatura
Osservazione sull'estrazione del bitume
Conclusioni

Introduzione

La presente tesi dal titolo “Impiego delle plastiche da RSU nei conglomerati bituminosi a caldo” affronta una tematica innovativa per il campo stradale e attuale per la sostenibilità ambientale: il mix design di un conglomerato bituminoso a caldo contenente plastiche da RSU al suo interno.

Questa ricerca sperimentale abbraccia quindi quelle che sono le esigenze mondiali attuali di uno sviluppo economico di tipo sostenibile, preservando in primis risorse naturali e abbattendone l'inquinamento ambientale dovuto alla produzione ex novo. Pertanto, diviene fondamentale riciclare e riutilizzare un materiale, usandolo come risorsa e non come rifiuto da destinare allo smaltimento in discarica. Difatti, anche l'istituzione dei criteri ambientali minimi (CAM) nell'ambito stradale vuole contribuire agli obiettivi nazionali di sviluppo sostenibile, riducendo spese e integrando gli aspetti ambientali basati sulla valutazione del ciclo di vita dei prodotti, attraverso lo sviluppo e l'aggiornamento di infrastrutture di qualità, affidabili, sostenibili e resilienti.

Qui nasce l'idea di poter utilizzare la plastica all'interno dei conglomerati bituminosi, combattendo tramite il riutilizzo, il suo smaltimento che rappresenta oramai una sfida globale. Negli ultimi anni c'è stata una enorme sensibilizzazione sul tema, difatti i tassi globali di riciclaggio si attestano ancora su valori troppo esigui e ogni anno si continuano a sversare in mare quantitativi enormi di rifiuti.

Si vuole sperimentare, tramite il mix design volumetrico della miscela, la fattibilità di utilizzo delle plastiche all'interno del conglomerato, partendo da quelle che potrebbero essere le difficoltà operative legate al confezionamento, per arrivare alle caratteristiche prestazionali della miscela bituminosa cercando di valutare se il loro utilizzo possa comportare una riduzione nell'uso del bitume vergine.

Si sperimenteranno tre tipologie di plastiche provenienti da RSU con diversi dosaggi, per capire come questi due parametri possano incidere sulle caratteristiche prestazionali della miscela.

Inizialmente si indagheranno miscele con un contenuto di bitume del 4,9%, i cui risultati si metteranno in relazione con miscele al 4,2% di bitume, per trarne le relative considerazioni.

La presente tesi sperimentale si articola in tre capitoli principali:

- Capitolo 1 nel quale si definisce lo stato dell'arte inerente agli argomenti trattati;
- Capitolo 2 dove si illustrano gli obiettivi e il programma sperimentale, con la descrizione delle relative apparecchiature di prova utilizzate;
- Capitolo 3 dove si espongono i risultati sperimentali ottenuti.

CAPITOLO 1

Stato dell'arte

Si espone inizialmente la pavimentazione stradale nel suo complesso, le funzioni che deve assolvere e le varie tipologie, descrivendo successivamente il degrado e la correlata manutenzione. Si passa al conglomerato bituminoso, materiale tradizionalmente costituito dalla miscelazione di aggregati lapidei, bitume, filler ed eventuali additivi, trattando le tipologie.

Si tocca il tema della sostenibilità ambientale, da associare inevitabilmente alla manutenzione stradale scaturito dal degrado: si parte dal riciclaggio delle risorse con gli obiettivi fissati dai CAM e dall'utilizzo del LCA, per poi trattare la plastica con le relative problematiche di smaltimento, il riciclaggio del conglomerato in generale ed infine la trattazione accademica fatta sull'utilizzo delle plastiche all'interno del conglomerato bituminoso, il tema centrale del presente lavoro sperimentale.

La pavimentazione stradale: funzionalità e composizione

Con il termine pavimentazione stradale, o sovrastruttura stradale, si indica sinteticamente la parte della strada più superficiale interessata dal moto dei veicoli e dagli agenti atmosferici, atta a garantire nel tempo la transitabilità del traffico veicolare in condizioni di comfort e sicurezza. Essa deve ripartire sul terreno (i.e. sottofondo) le azioni statiche e dinamiche dei mezzi di trasporto, fornire una superficie di rotolamento regolare e poco deformabile, proteggere il terreno sottostante dagli agenti atmosferici. Deve pertanto assolvere sia requisiti strutturali che funzionali.

I requisiti strutturali comprendono la portanza ovvero la capacità di sopportare i carichi veicolari e la durabilità, ovvero la resistenza ai fenomeni di degrado dovuti agli eventi atmosferici vigenti.

Quelli funzionali, direttamente dipendenti dall'interazione tra pneumatico e pavimentazione sono strettamente connessi a comfort e sicurezza di guida percepiti da parte degli utenti stradali.

Includono regolarità del piano viabile, aderenza pneumatico-piano di rotolamento, inquinamento acustico prodotto dal rotolamento dello pneumatico.

La pavimentazione è realizzata con più strati sovrapposti di materiali differenti, ognuno dei quali assolve a specifiche funzioni. Si distinguono tre principali tipologie di pavimentazioni stradali (Fig. 1), che presentano diversi comportamenti in esercizio e distribuzione dei carichi al sottofondo, in ragione della diversa scelta di materiali e spessori costituenti il pacchetto stradale, oltre che dalle caratteristiche dei carichi cioè dalla superficie di contatto tra carico e pavimentazione:

- flessibili;
- semi-rigide;
- rigide.

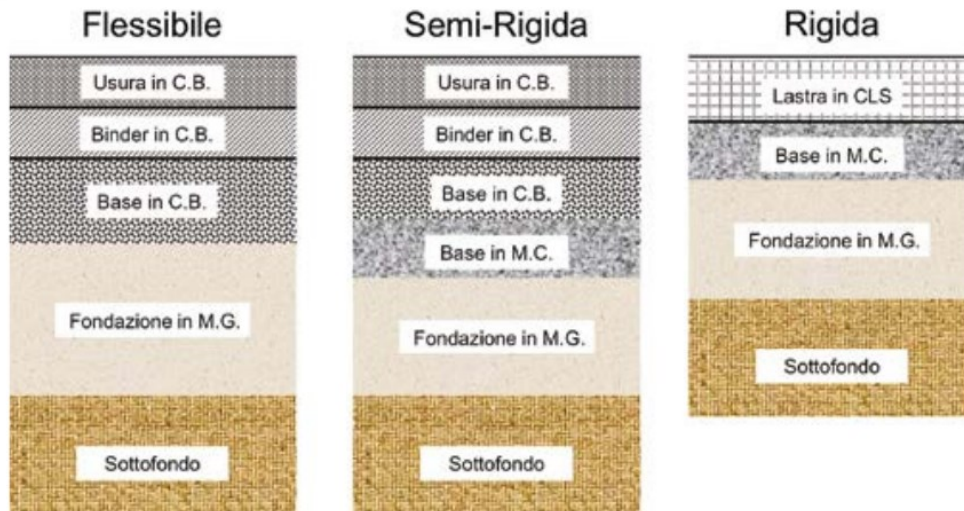


Figura 1 – Tipologie di pavimentazione e relativa composizione stratigrafica

In generale, risalendo da quote più profonde verso la superficie, si possono individuare i seguenti strati di qualità via, via crescente:

- sottofondo;
- fondazione;
- base;
- binder;
- usura.

La stragrande maggioranza della rete viaria italiana risulta costituita da pavimentazioni flessibili, la cui peculiarità risiede nell'impiego di conglomerato bituminoso per il confezionamento degli strati legati del pacchetto strutturale (base, binder, usura). Essi poggiano sullo strato di fondazione (stabilizzato o non) che a sua volta trasferisce i carichi verso il terreno di appoggio (sottofondo).

Il meccanismo di resistenza è basato sulla flessibilità, cioè la pavimentazione deve flettersi a seguito dell'applicazione del carico senza superare la resistenza a trazione nella base degli strati legati, ovvero la zona di massima tensione. Deve esserci altresì una variazione di rigidità graduale tra gli strati affinché la pavimentazione possa comportarsi come corpo unico.

In generale, considerando condizioni di carico analoghe, si può affermare che le pavimentazioni flessibili rispetto alle pavimentazioni rigide, sono caratterizzate da una vita utile ridotta poiché risulta minore la portanza complessiva della pavimentazione (influenzata dal comportamento visco-elastico

e termo-dipendente degli strati legati a bitume). Tuttavia, esse garantiscono maggior semplicità costruttiva e facilità di intervento in fase manutentiva. Nelle pavimentazioni rigide, le condizioni ambientali (gradienti termici e variazioni igrometriche) possono indurre nella lastra in calcestruzzo notevoli tensioni potenzialmente nocive e presentando numerosi punti di discontinuità (giunti) sono spesso causa di prematura fessurazione. Una soluzione intermedia tra le due è rappresentata dalle pavimentazioni semi-rigide, costituite da un pacchetto strutturale analogo a quello delle pavimentazioni flessibili a cui si aggiunge uno strato di sotto-base in misto cementato (interposto tra la base in conglomerato bituminoso e la fondazione in misto granulare). Questa soluzione tipologica è solitamente adottata per pavimentazioni a forte traffico pesante.

I conglomerati bituminosi

Il conglomerato bituminoso è una miscela accuratamente proporzionata di aggregati lapidei, tradizionali o di riciclo, di un legante di tipo bituminoso, tradizionale o modificato con aggiunta di polimeri ed eventualmente additivi che vadano a modificarne le caratteristiche o a migliorarne le performance. La diffusione dei conglomerati per la costruzione delle pavimentazioni stradali è infatti anche legata alla grande varietà di miscele ottenibili operando sulla quantità e qualità dei materiali costituenti, varietà che permette di avere a disposizione prodotti rispondenti a esigenze diverse in termini di prestazioni funzionali e strutturali (e.g. tessitura, regolarità, impermeabilità, rumorosità, drenabilità). La miscela viene quindi utilizzata per la realizzazione delle pavimentazioni utilizzate in ambito stradale, e più precisamente negli strati superiori, quali usura, binder e base, con prestazioni che tendono a migliorare risalendo verso la superficie. Gli aggregati devono essere opportunamente graduati in termini dimensionali (dalla dimensione massima fino al filler) così come deve essere adeguatamente studiata la quantità di bitume in modo da ottenere caratteristiche volumetriche specifiche (percentuale di vuoti controllata) e adeguate prestazioni sotto carico. Ciò si traduce essenzialmente in miscele con elevata stabilità, vale a dire che a seguito del passaggio dei veicoli la miscela in conglomerato non subisca deformazioni permanenti e ammaloramenti e sia al contempo resistente a fatica.

Per i conglomerati utilizzati superficialmente, che vengono posti a contatto con lo pneumatico, sono richieste prestazioni ottimali, e in generale il soddisfacimento di un'ampia serie di requisiti. Innanzitutto, il conglomerato deve garantire un coefficiente di aderenza elevato, ai fini della sicurezza: dipende dalla natura delle superfici a contatto con lo pneumatico e dalla micro e macro-tessitura propria del conglomerato, oltre a regolarità e ridotta rumorosità. Non meno importante è l'aspetto che riguarda la durabilità.

I *conglomerati bituminosi tradizionali* vengono definiti anche “*a caldo*”: la composizione classica prevede la miscelazione degli inerti e del legante bitume. Nel caso dei conglomerati modificati si possono avere aggiunte di additivi per scopi diversi, o direttamente l’utilizzo di bitume modificato con polimeri. La definizione “a caldo” prende origine dalle modalità di confezionamento e posa in opera del conglomerato: la produzione avviene in stabilimento, dapprima mescolando gli inerti sino ad ottenere l’assortimento granulometrico di progetto, e poi aggiungendo, per spruzzo, il legante bituminoso. La temperatura degli aggregati, all’atto della miscelazione negli impianti di produzione, è generalmente compresa tra i 160 e 180 °C; quella del legante (bitume), tra 150 e 170 °C.

La preparazione e la stesura del conglomerato, avviene mediante le macchine emulsionatrici, costituite da una caldaia per mantenere fluido il bitume, e da un irroratore a pressione, azionabile manualmente dall’operatore, per stendere uniformemente l’emulsione sulla zona di lavoro. Il bitume irrorato ha la funzione di collante, e va steso anche qualora si debba incollare uno strato di conglomerato bituminoso su di uno preesistente. Per mezzo delle vibrofinitrici, poi, avviene la posa del conglomerato bituminoso. La miscela non va sottoposta a temperature eccessivamente elevate, poiché si potrebbero compromettere le proprietà leganti del bitume: tuttavia, la lavorabilità non può prescindere dal riscaldamento, fino ad ottenere una consistenza adeguata alle operazioni. Solitamente, il periodo ideale di confezionamento e di stesura della miscela bituminosa è quello che va da marzo a novembre.

L’aggiunta di additivi (warm) al legante bituminoso o tramite l’utilizzo del metodo di schiumatura, permettono di abbassare la viscosità del bitume consente di ottenere un *conglomerato tiepido* (*W.M.A. - Warm Mix Asphalt*) la cui principale peculiarità si riscontra nelle minori temperature di produzione e applicazione in opera, anche di 20÷40 °C rispetto ad un conglomerato bituminoso tradizionale, portando diversi benefici: riduzione dei fumi del 50 %, minori emissioni con migliori condizioni di lavoro per gli addetti ai lavori, minor effetto di irrigidimento del bitume, vantaggi ambientali.

Utilizzando aggregati non riscaldati ed emulsione bituminosa o bitume schiumato, si ottiene un *conglomerato bituminoso a freddo*.

Il bitume

Il bitume deriva dai processi di raffinazione del petrolio grezzo. Il processo di produzione più comune è quello della distillazione frazionata mediante il quale si ottiene il frazionamento del grezzo sfruttando le differenze esistenti fra le temperature di ebollizione dei suoi vari componenti.

Esso rappresenta la *componente legante* dei conglomerati bituminosi, responsabile di tenere insieme le particelle di aggregato garantendo consistenza e coesione sotto carico. Pur rappresentando la componente nettamente minoritaria del conglomerato (circa il 5% in peso rispetto agli aggregati), le sue caratteristiche influenzano in maniera altrettanto importante quanto quelle dell'aggregato le proprietà finali della miscela in conglomerato. La scelta di impiegare bitume per il confezionamento dei conglomerati scaturisce primariamente dalla necessità di conferire alle miscele caratteristiche di *adesione* (legame tra bitume e aggregati), *coesione* (adesione tra le particelle di bitume, caratteristica intrinseca del legante) e *impermeabilizzazione*.

Le proprietà variano con la temperatura, quindi ha un comportamento *termo-dipendente* ed essendo un materiale viscoso, possiede caratteristiche *tempo-dipendenti* con risposte al carico che variano in base alla frequenza di applicazione.

Pertanto, occorrerà fare scelte oculate in base alle condizioni di esercizio.

Il comportamento reologico del bitume dipende dallo stato di aggregazione delle micelle e dunque dal rapporto tra le sue parti costituenti: *asfalteni*, *malteni* e *resine*. In tal senso, occorre considerare che la proporzione tra i costituenti del bitume non rimane costante nel tempo, ma tende a variare a seguito dell'interazione chimica tra il bitume e l'ossigeno. Nel tempo il bitume tende infatti a "invecchiare". Si parla di invecchiamento a breve e lungo termine. Quello a breve termine è legato all'esposizione del legante ad elevatissime temperature durante le fasi di miscelazione e posa in opera (superiori a 130°C). Quello a lungo termine si manifesta invece in sito durante tutto l'arco della vita utile della pavimentazione ed è fondamentalmente determinato dall'esposizione del materiale agli agenti atmosferici (e.g. irraggiamento solare, acqua, vento). In ambo i casi, il bitume subisce fenomeni di *ossidazione* che comportano la perdita delle componenti volatili più leggere (malteni). Conseguentemente, il legante risulta progressivamente più ricco di asfalteni (la componente più dura e consistente) e tende quindi a diventare più rigido, ma anche potenzialmente più fragile e maggiormente esposto al fenomeno della fessurazione.

Questione rilevante anche nell'ottica del riciclo, poiché le miscele riciclate tenderanno ad essere più rigide e fragili rispetto a quelle con utilizzo di bitume vergine, poiché il bitume invecchiato del fresato tenderà a riattivarsi e miscelarsi con quello vergine. Per bilanciare questo irrigidimento, è necessario l'utilizzo di specifici additivi rigeneranti e una scelta del bitume vergine di agguanta più soffice.

Tipologie di bitume

La classificazione e il controllo quantitativo/qualitativo dei bitumi stradali avvengono attraverso una serie di prove che consentono di definire parametri empiricamente connessi alle prestazioni in esercizio della pavimentazione. Tali prove rappresentano il riferimento sulla base del quale si fondano le attuali norme tecniche europee per la classificazione e accettazione dei bitumi stradali.

La prova di penetrazione (UNI EN 1426) è quella impiegata per la *classificazione* dei bitumi. Con questa prova si determina la consistenza e durezza del materiale a temperatura ambiente (i.e. 25°C), misurando la penetrazione in dmm di un ago standardizzato sotto un carico di 100 g entro 5 s dall'inizio della penetrazione. Quanto più il bitume è molle, tanto maggiore è la penetrazione. La classificazione del bitume viene espressa in base al grado di durezza come intervallo di valori (es. un bitume classificato 50/70 ha una penetrazione compresa tra 50 e 70 dmm).

Tradizionalmente, nei conglomerati bituminosi per uso stradale è stato impiegato per decenni bitume tal quale del tipo 50/70 o 70/100.

Per migliorare le prestazioni del conglomerato in esercizio avvicinandosi al comportamento ideale sopra descritto, è possibile ricorrere all'impiego di *bitumi modificati* con aggiunta di polimeri. Modificare un bitume tramite l'aggiunta di componenti "esterne" (i.e. polimeri termoplastici di tipo plastomerico o elastomerico) comporta variazioni delle caratteristiche fisiche, chimiche e reologiche del materiale. A parità di penetrazione, si può affermare che i bitumi modificati garantiscono, rispetto ad un bitume tradizionale, un intervallo di elastoplasticità mediamente più elevato (Fig. 2)

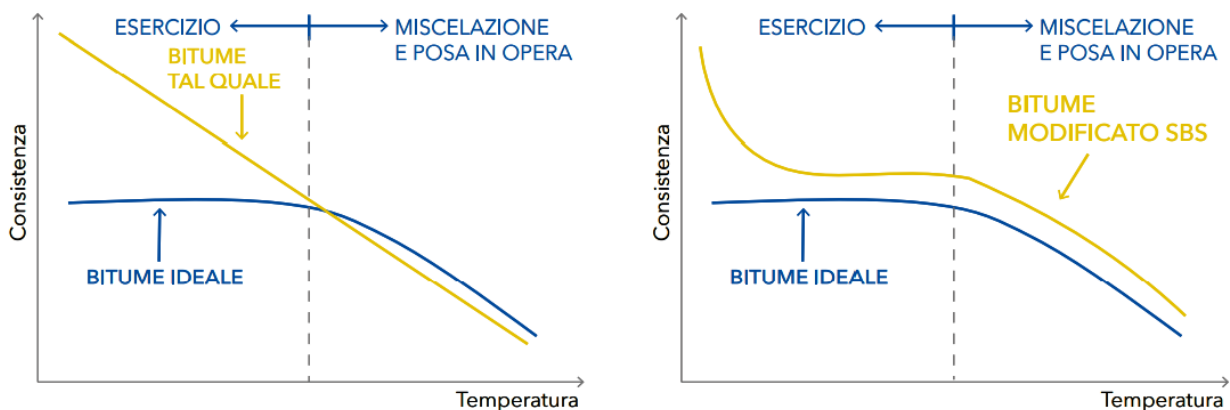


Figura 2 - Comportamento bitumi tal quali e modificati

Il polimero permette quindi al bitume, quindi ai conglomerati prodotti, di garantire maggiore resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti anche laddove la pavimentazione sia esposta a temperature di esercizio mediamente elevate in corrispondenza di notevoli flussi di traffico veicolare

pesante, così come un miglior comportamento in climi freddi, riducendo la fragilità alle basse temperature. La presenza del polimero consente, inoltre, un miglior assorbimento delle sollecitazioni cicliche indotte dal traffico veicolare (maggiore resistenza a fatica). Al contempo riduce la tendenza del materiale all'invecchiamento, conferendo pertanto maggiore durabilità all'intera miscela, e migliora l'adesione tra componente legante e lapidea (allontanando il pericolo di fenomeni di spogliamento e sgranamento). Per ottenere una buona lavorabilità durante le fasi di miscelazione e compattazione, occorre comunque sottolineare che si deve riscaldare la miscela a temperature più elevate rispetto a quanto necessario per miscele confezionate con bitume non modificato (mediamente superiori di almeno 15-20°C).

Le norme tecniche di Capitolato Anas distinguono due possibili tipologie di bitume modificato: si parla di bitume “*soft*” quando si considerano tenori di polimero limitati (le caratteristiche meccaniche e reologiche del bitume variano entro un intervallo ristretto), mentre la modifica si definisce “*hard*” quando il tenore di polimero è tale da influenzare in maniera significativa il comportamento reologico del bitume stesso (rendendolo assimilabile a quello del polimero aggiunto).

Considerando la ridotta differenza di costo tra le diverse tipologie di bitume, occorrerebbe optare sempre per i bitumi modificati date le sue caratteristiche nettamente migliori.

Degrado e manutenzione delle pavimentazioni

Si definisce la vita utile di una pavimentazione come il periodo di tempo dopo il quale, per diverse cause, principalmente dovute ad agenti atmosferici e alle azioni del traffico, non vengono più garantiti i requisiti funzionali e strutturali che la pavimentazione deve soddisfare ed è necessario un intervento manutentivo, affinché ci sia un livello di servizio adeguato soprattutto in relazione alla sicurezza di circolazione.

Un sistema infrastrutturale efficiente si traduce in uno sviluppo economico-sociale e qualitativo del territorio. Difatti, ancora oggi il trasporto su gomma rappresenta la mobilità di spostamento più utilizzata per la movimentazione di persone e merci.

La rete viaria nazionale ha vissuto una forte espansione nei decenni passati in concomitanza dell'accelerazione dello sviluppo economico dell'intero Paese.

Si è tuttavia registrata una ridotta attività manutentiva preventiva tale da garantire un costante e soddisfacente livello funzionale. Ciò in ragione di una limitata disponibilità di risorse economiche e di una conoscenza ridotta dell'entità “pavimentazione” intesa come struttura, a partire dalla scelta consapevole dei materiali costituenti e dalla progettazione oculata del pacchetto strutturale, fino ad

arrivare a un impiego appropriato delle tecnologie innovative disponibili sul mercato e alla corretta gestione delle fasi di controllo prima, durante e dopo la realizzazione dell'opera.

I dissesti tipici delle pavimentazioni stradali flessibili possono essere classificati in varie macrocategorie come segue:

- *fessurazioni*, distinguibili in diverse tipologie a seconda della conformazione e delle cause. Tra esse sono identificabili fessurazioni a blocchi, di riflessione dei giunti, trasversali e longitudinali, di bordo, da scorrimento e fessurazioni ramificate o "a pelle di cocodrillo". Queste ultime sono una serie di fessure longitudinali e trasversali tra loro interconnesse a formare un reticolo. Sono riconducibili a fenomeni di fatica causati dal transito del traffico veicolare manifestandosi con due modalità: meccanismo "bottom-up", vale a dire propagazione delle fessure dal basso verso l'alto (Fig. 3). Il peso trasferito allo pneumatico provoca la flessione della pavimentazione, in particolare tra strati legati e non legati, con il conseguente instaurarsi di sollecitazioni di trazione. Il passaggio ripetuto dei veicoli provoca microfessurazioni proprio su questa interfaccia, che al susseguirsi delle sollecitazioni si propagano verso la superficie. Uno stato fessurativo diffuso è segno che gli strati in conglomerato bituminoso sono totalmente compromessi.

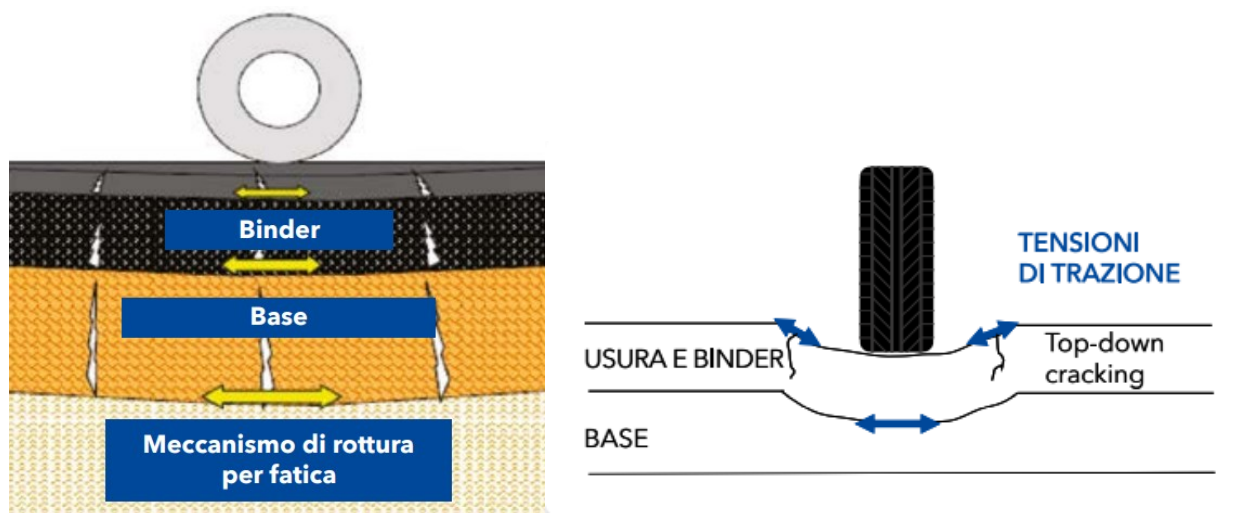


Figura 3 - Fessurazione di tipo "bottom-up" a sinistra e di tipo "top-down" a destra

Nel caso invece di meccanismo "top-down" (Fig. 3), la rottura si innesca nella sommità della pavimentazione e si propaga successivamente verso gli strati più profondi. Questa tipologia di fessure, più frequente in caso di pavimentazioni rigide, si manifesta al bordo della zona di impronta degli pneumatici a seguito degli sforzi di trazione generati fuori dall'area di contatto.

- *distorsioni*, aree localizzate con quota inferiore a quella circostante o depressione superficiale con possibili ristagni d'acqua. Vale a dire alterazioni della regolarità della pavimentazione come ormaie, scorrimenti, rigonfiamenti e depressioni, corrugamenti, cedimenti del margine della carreggiata. Le cause sono solitamente miscele bituminose deformabili, cedimenti o scarsa portanza degli strati inferiori, post-compattazione da traffico.
- *pelature e sgranamenti*: per pelature si intende il distacco o consumo localizzato di blocchi di tappeto o trattamento superficiale con formazione di aree depresse caratterizzate da bordi ben definiti (la superficie dello strato inferiore risulta facilmente identificabile). Con sgranamenti, invece, si individua la progressiva disgregazione della superficie dovuta al distacco di inerti. Le cause sono imputabili a un eccessivo irrigidimento del bitume, impiego di miscele di bassa qualità, eccessivi sforzi di tipo tangenziale sulla pavimentazione a seguito del transito veicolare o sversamento di oli/sostanze chimiche che alterano il legame tra legante e aggregati lapidei.
- alterazioni del piano di rotolamento degli pneumatici come *risalita di bitume*, *levigatura degli aggregati o buche*. Le buche sono cavità nella pavimentazione con distacco e perdita di materiale imputabile all'evoluzione di altri dissesti: acqua che penetra compromettendo adesione bitume-aggregato, cattivo mix design della miscela, cattiva compattazione.
- *rappezi ammalorati*, cioè porzioni che avevano già subito una riparazione precedente e che presentano nuovamente criticità. È un punto di discontinuità della pavimentazione che costituisce un punto preferenziale per l'innescò di ulteriori dissesti.

Per progettare adeguatamente gli interventi di manutenzione bisogna quindi individuare il tipo di dissesto e la causa che lo ha generato, arginando tempestivamente quelle situazioni di ammaloramento ancora embrionale.

In generale, il fenomeno di degrado delle pavimentazioni è piuttosto complesso: per altro, oltre alle temperature a cui è soggetta la struttura, intervengono in maniera sensibile altri fattori. La velocità di applicazione dei carichi è uno di essi; risulta intuitivo come un veicolo ad alta velocità provochi sollecitazioni ben diverse dal transito di un veicolo a velocità ridotte (generalmente il più gravoso). Un chiaro esempio di complessità si evince già analizzando congiuntamente i diversi meccanismi di fessurazione, in funzione solo delle diverse temperature di esercizio: il fenomeno della fessurazione a fatica, imputabile a sollecitazioni che avvengono a temperature prossime ai 20 °C, può essere prevenuto con l'utilizzo di conglomerati in cui il legante risulta maggiormente tenero. Di contro, il meccanismo dell'ormaiamento a temperature elevate, si può prevenire con conglomerati costituiti da bitumi a rigidità elevata.

La crisi economica che in questo periodo si sta affrontando rende necessario aumentare la redditività dei ridotti budget disponibili da parte dei singoli paesi. Se si considera anche il fatto che gli interventi di manutenzione comportano notevoli consumi di risorse pregiate e non rinnovabili, quali aggregati lapidei e bitume, e che vengono contestualmente prodotte ingenti quantità di materiali di risulta, con costi sia economici di dismissione, che ambientali di inquinamento, si rende ancora più necessaria la ricerca di una soluzione alternativa al problema, attraverso l'uso di tecnologie costruttive a basso impatto ambientale e, al tempo stesso, che risultino sicure e durevoli. Il raggiungimento di questi obiettivi dipende, in particolare, da un appropriato impiego dei materiali sia tradizionali sia innovativi, da un corretto dimensionamento strutturale della pavimentazione e da una manutenzione adeguatamente programmata che ne garantisca la conservazione

Riciclaggio per sfruttamento sostenibile delle risorse

Per la sostenibilità ambientale, è fondamentale il riciclo. Infatti, per lo sfruttamento sostenibile delle risorse a disposizione, il riciclo dei rifiuti è fondamentale ed essenziale. Il riciclo e non solo, con il riutilizzo creativo dei rifiuti, si tutela l'ambiente e la salute.

Così invece di essere sprecati e finire in discarica, con conseguenti danni ambientali e costi, vengono riutilizzati in un processo circolare.

Per riciclo dei rifiuti si intende l'insieme di strategie e metodologie messe in atto per recuperare materiali utili dai rifiuti. In questo modo, il materiale di riciclo può essere nuovamente utilizzato. Così si evita di smaltire tutti i rifiuti in discarica. Il riciclo garantisce maggiore sostenibilità al ciclo di produzione/utilizzazione dei materiali, riduce il consumo di materie prime, l'utilizzo di energia e l'emissione di gas serra associati.

Il riciclo non sostituisce la discarica e l'inceneritore, ma ne diminuisce l'utilizzo con grande vantaggio per l'ambiente e per la sostenibilità economica.

I materiali riciclabili includono tutti i rifiuti che possono essere riutilizzati per produrre nuovi oggetti uguali allo scarto (vetro, carta) oppure utilizzati per produrre nuovi materiali (legno, tessuti).

La forma di riciclo che rende di più in termini di basso impatto e costo ambientale è proprio il riutilizzo, cioè il riuso dei rifiuti.

Possono diventare materiali riciclati:

legno; vetro; carta e cartone; tessuti; pneumatici; alluminio; acciaio; plastica; rifiuti organici.

La plastica merita un discorso a parte, in ordine al riciclo. Quando diciamo plastica intendiamo infatti un insieme piuttosto diversificato di materiali.

Un oggetto in plastica è infatti composto nella maggior parte dei casi da diversi tipi di plastica. Riciclare la plastica significa quindi utilizzare dei macchinari e un complesso sistema di lavorazione in grado di dividere i vari tipi di plastica. Il processo è dispendioso in termini ambientali. Ne consegue che differenziare la plastica non è una soluzione al problema ambientale. È necessaria una diminuzione della produzione e dell'utilizzo di questo materiale.

La raccolta differenziata dei rifiuti è il primo passo per un corretto riciclaggio dei rifiuti: i privati cittadini svolgono una prima differenziazione, in base al tipo di rifiuto.

Lo scopo del riciclo è quello di indirizzare ogni tipo di rifiuto verso trattamento di smaltimento o recupero dei materiali più adatto, che va dallo stoccaggio in discarica o all'incenerimento / termovalorizzazione per il residuo indifferenziato, al compostaggio per l'organico e al riciclo per il differenziato riciclabile come carta, vetro, alluminio, acciaio e plastica

Life Cycle Assessment (LCA)

L'obiettivo di individuare e applicare pratiche sostenibili dal punto di vista ambientale è raggiungibile attraverso l'uso di uno strumento nato per l'analisi dei sistemi industriali ed in forte espansione a livello internazionale: il Life Cycle Assessment (LCA) o Valutazione del Ciclo della Vita.

L'LCA può essere definito come lo strumento di ottimizzazione dell'impatto ambientale di un sistema attraverso lo studio del risparmio dell'energia e delle risorse non rinnovabili. Il Life Cycle Assessment rappresenta il principale strumento operativo del "Life Cycle Thinking" definito come "il processo oggettivo di valutazione dei carichi ambientali connessi con un prodotto/processo/attività attraverso l'identificazione e la quantificazione dell'energia e dei materiali utilizzati, dei rifiuti lasciati nell'ambiente, al fine di quantificare l'impatto, valutare e realizzare le opportunità di miglioramento ambientale"

L'analisi comprende il ciclo completo di un prodotto, processo o attività e cioè:

- Produzione di materie prime;
- Lavorazione;
- Trasporto e distribuzione;
- Uso e riutilizzo;
- Manutenzione;
- Riciclaggio, eliminazione finale o distruzione.

I motivi che spingono ad utilizzare l'LCA come strumento d'analisi di un prodotto sono molteplici, tra i più importanti possiamo sicuramente annoverare i seguenti:

- Raggiungimento di un maggior controllo delle prestazioni ambientali di un prodotto e/o di un processo;
- Evidenziare i punti deboli del processo produttivo: individuando le fasi sulle quali è possibile intervenire per diminuire l'impatto ambientale del prodotto, si può arrivare a ridurre i consumi di energia, di materie prime e la produzione di rifiuti, diminuendo di conseguenza, i costi di produzione;
- Valutare la prestazione ambientale di un prodotto rispetto a un prodotto analogo, in modo tale da poter fare delle opportune scelte;
- Progettare e quindi realizzare un prodotto che causi un minor impatto ambientale;
- Individuare le possibili migliorie tecnologiche e gestionali di un prodotto e del suo indotto nell'ottica dello sviluppo sostenibile;
- Migliorare l'immagine del prodotto e dell'azienda, nei confronti del pubblico;

Realizzare una raccolta completa ed organica di tutti i dati relativi alla fabbricazione di un prodotto, creando così un sistema informatico che supporti un sistema di gestione ambientale, tenendo sotto controllo le emissioni, i consumi delle risorse e gli effetti connessi. L'utilizzo dell'LCA però può risultare anche oneroso, sia in termini di economici che di tempo, e complesso da eseguirsi in quanto si devono acquisire delle notevoli quantità di dati ambientali durante ogni fase del ciclo della vita; è per questo motivo che a volte può essere sufficiente fermarsi al primo stadio dell'analisi, il cosiddetto Life Cycle Inventory (LCI), per poter apprezzare i vantaggi e gli svantaggi ambientali collegate ad alcune scelte. Nell'LCI sono previsti tre momenti e cioè:

- La raccolta dei dati (prevede la spiegazione in dettaglio delle modalità di acquisizione e delle categorie a cui i dati appartengono);
- Il processo di calcolo (elabora i dati in ingresso tramite algoritmi che simulano i processi industriali in esame; i risultati ottenuti dal processo di calcolo sono le emissioni gassose, solide e liquide, le quantità di prodotto finito e/o lavorato, i consumi energetici);
- L'interpretazione dei risultati (prevede la verifica della qualità dei dati e dei risultati e la valutazione della correttezza delle scelte metodologiche assunte nel procedimento di calcolo).

Criteri Ambientali Minimi CAM

La Commissione Europea nel 2003 invitava gli Stati Membri a adottare dei piani d'azione nazionale PAN per incoraggiarli a dotarsi di Piani d'Azione per integrare le esigenze ambientali negli appalti pubblici.

Nel 2008 il Ministero Economia e Finanza e Sviluppo Economico ha adottato il Piano d'Azione per la sostenibilità dei consumi nel settore della Pubblica Amministrazione (PAN Green Public Procurement).

I CAM sono requisiti ambientali definiti dal Ministero della Transizione Ecologica. L'art. 34 del D. Lgs. 50/2016 ha introdotto l'obbligo dei CAM negli appalti pubblici; Il CAM strade è il documento che definisce i Criteri Ambientali Minimi per la progettazione e i lavori inerenti a costruzione, manutenzione e adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali; risponde soprattutto all'esigenza di razionalizzare i consumi e ridurre le spese della PA. Le pubbliche amministrazioni hanno l'obbligo di inserire nella documentazione di gara e in quella progettuale, le specifiche tecniche e le clausole contrattuali contenute nei CAM. I CAM Strade permetteranno alle Pubbliche Amministrazioni di contribuire agli obiettivi nazionali di sviluppo sostenibile, riducendo spese e integrando gli aspetti ambientali basati sulla valutazione del ciclo di vita dei prodotti, attraverso il raggiungimento di obiettivi tra cui:

- Sviluppare infrastrutture di qualità, affidabili, sostenibili e resilienti
- Aggiornare le infrastrutture per renderle sostenibili, con maggiore efficienza delle risorse da utilizzare e una maggiore adozione di tecnologie pulite
- Raggiungere la gestione sostenibile e l'uso efficiente delle risorse naturali
- Ridurre, in modo sostanziale, la produzione di rifiuti attraverso la prevenzione, la riduzione, il riciclaggio e il riutilizzo

I rifiuti di plastica come sfida globale

La resistenza, la flessibilità e la leggerezza delle tradizionali plastiche derivate dal petrolio le rendono materiali ideali per un gran numero di applicazioni, quindi risulta uno dei polimeri leader in tutto il mondo in termini di utilizzo.

La cultura dello scarto, unita a quella del monouso, portano all'accumulo di rifiuti e all'inquinamento.

Secondo dati raccolti nel 2016 dal Centre for International Environmental Law, 335 milioni di tonnellate di plastica vengono prodotte annualmente a livello globale: nell'UE, il 70% dei rifiuti di plastica raccolti finisce in discarica o è incenerito. Il 93 % dei rifiuti di plastica prodotti, finisce nelle discariche e negli oceani. Ogni anno almeno 8 milioni di tonnellate di plastica finiscono negli oceani del mondo e, ad oggi, si stima che via siano più di 150 milioni di tonnellate di plastica negli oceani.

Il potenziale per il riciclaggio dei rifiuti di plastica rimane in gran parte non sfruttato, con tassi globali molto bassi di riciclaggio e plastica riciclata che rappresentano solo il 6%. Il prezzo elevato e la bassa qualità delle plastiche riciclate rispetto alle plastiche vergini limitano le applicazioni commerciali.

La maggior parte delle materie plastiche a base di petrolio sono altamente resistenti alla biodegradazione il che significa che una volta raggiunto l'ambiente si accumuleranno inevitabilmente.

C'è un rischio a lungo termine di rilascio di sostanze chimiche pericolose dai rifiuti di plastica nelle discariche, oltre agli effetti della trasformazione in petro-polimeri sempre più piccoli e tossici, le microplastiche che inficiano sulle proprietà biofisiche del terreno e sulla contaminazione delle acque sotterranee con annessi danni a fauna marina.

Le strategie di gestione dei rifiuti sono prevenzione e riduzione dei rifiuti, seguito da riutilizzo, riciclaggio, recupero energetico e smaltimento.

L'impatto ambientale della plastica è legato anche alla produzione di plastica vergine, generata da prodotti chimici derivanti dal petrolio, gas naturale e carbone, che implica una grande quantità di emissioni di CO₂.

Ridurre i rifiuti di plastica nell'ambiente è fondamentale per preservare la vita degli ecosistemi.

L'industria del riciclo della plastica in Italia è in crescita, con benefici per l'ambiente e per l'economia. L'Italia si colloca al terzo posto dopo Germania e Spagna per il tasso di riciclo della plastica. In discarica sono ormai destinati solo il 20% dei rifiuti, quantità che può essere ancora ridotta. Il beneficio economico è di 2 miliardi di euro, in quanto grazie al riciclo non si è consumata materia prima, si è prodotta energia e si sono ridotte le emissioni di CO₂. Tutti i dati sono raccolti nel Green Economy Report, a cui hanno lavorato Corepla e Fondazione per lo Sviluppo Sostenibile.

Quindi, è sicuramente positiva la crescita rapida che ha l'industria del riciclo, ma non dobbiamo dimenticare che cresce anche la quantità di plastica prodotta e poi raccolta.

L'uso della plastica si è affermato in diversi settori, tanto da farla divenire il terzo materiale artificiale più diffuso.

Esistono diverse tipologie di plastiche, composte da diversi polimeri, che sono adatte a molti scopi, anche in campo alimentare. I vari materiali plastici si contraddistinguono per alcune caratteristiche comuni quali la leggerezza e la facilità di lavorazione.

Le plastiche più diffuse sono:

- Il polietilene (PE), usato per sacchetti di plastica, adesivi e bottiglie;
- Il cloruro di polivinile (PVC), utilizzato molto anche nel settore edile;
- Il polipropilene (PP), usato anche per oggetti di arredamento;
- Il polietilentereftalato (PET), principalmente usato per la produzione di bottiglie;
- Il polistirene (PS), molto utilizzato nel settore alimentare.

Non tutti i rifiuti realizzati in plastica possono essere riciclati. In generale, è possibile avviare al processo di riciclaggio tutti i prodotti che recano le sigle PE, PET e PVC, mentre si escludono tutte le altre plastiche e i contenitori con residui di materiali organici o pericolosi.

Il riciclo della plastica permette di ottenere nuovi prodotti e, durante la loro lavorazione, anche energia e calore. Il processo di riciclaggio può essere meccanico, quando grazie ad una lavorazione termica o meccanica del materiale si ottiene un nuovo prodotto. In alternativa, il riciclaggio chimico riporta la plastica alla sua forma originale, ottenendo nuova materia prima per la produzione. Soprattutto il PVC riciclato può essere utilizzato per la realizzazione di diversi prodotti quali tubi ed elementi per il drenaggio delle acque, raccordi vari e altri prodotti edilizi. Le possibilità sono molte, ma in Europa ancora manca un vero e proprio mercato. La domanda di prodotti derivanti dal riciclo della plastica è ancora troppo bassa ed è necessaria una maggior sensibilizzazione.

Metodi impiegati per combattere i rifiuti di plastica

Allo stato attuale, la dismissione dei rifiuti di polietilene è uno dei maggiori problemi in tutto il mondo. In ogni caso, tutta quella plastica che non può essere riciclata, può essere destinata alla termovalorizzazione, che permette il recupero energetico grazie al potere calorifico di questo materiale. Purtroppo, vengono bruciati anche alcuni rifiuti che portano alla generazione di molti gas tossici.

Al fine di ridurre i rifiuti di plastica, la popolarità della gestione dei rifiuti in plastica tra il pubblico deve migliorare modificando le conoscenze, gli atteggiamenti e i comportamenti verso essa. Esistono:

- quattro metodi di gestione, che sono le 4R: riduzione, riutilizzo, riciclaggio e rigenerazione;
- due strategie: discarica e incenerimento;

- quattro fasi del riciclaggio: pulizia, separazione, ordinamento e compressione;
- la conoscenza del ciclo di vita delle materie plastiche.

Ci sono alcuni importanti modi (discarica, incenerimento, riciclaggio, costruzione di strade, produzione di benzina e degrado) per smaltire i rifiuti di polietilene come da letteratura, e ciascuno di questi metodi ha pregi e demeriti gli uni sugli altri. Ogni metodo è discusso in dettaglio come segue:

Discarica

La maggior parte dei rifiuti solidi urbani insieme ai rifiuti di plastica finisce in discarica.

Tra i rifiuti di plastica totali, il 65% finisce in discarica. La plastica che va in una discarica non si degrada per migliaia di anni.

La disponibilità limitata dell'ossigeno è responsabile della lenta o minima degradazione del polietilene in discarica.

I rifiuti di plastica presenti in queste discariche portano alla produzione di composti tossici sia in forma gassosa che percolata come benzene, etilbenzeni, toluene, trimetilbenzene, xileni e bisfenolo A (BPA).

Incenerimento

Il secondo metodo più comune utilizzato per smaltire i rifiuti di plastica è l'incenerimento. Il 25% dei rifiuti di plastica viene bruciato nell'ambiente per superare alcuni dei problemi della discarica come occupazione dello spazio e fertilità del suolo, ma d'altra parte porta alla produzione di gas tossici riversati nell'ambiente come anidride carbonica, metalli pesanti, policiclici idrocarburi aromatici (IPA), policlorobifenili (PCB), carboni tossici e radicali liberi, furani e diossine a base di ossigeno.

Questi gas tossici causano varie malattie tra gli abitanti delle località vicine a questi siti di incenerimento. Sia discarica che incenerimento non sono metodi rispettosi dell'ambiente e quindi ci spingono a pensare per alcuni tecniche alternative, e per questo il riciclaggio dei rifiuti di plastica sembra essere la migliore alternativa.

Riciclaggio

Tra i rifiuti di plastica totali generati, solo il 10% dei rifiuti di plastica viene riciclato in tutto il mondo.

Tuttavia, ci sono vari fattori che ostacolano l'efficienza del processo di riciclaggio della plastica e portano al recupero di prodotti di bassa qualità come la presenza di impurità. Inoltre, esistendo varie tipologie di plastiche, è richiesto un processo di separazione manuale per riciclare singolarmente i diversi tipi di plastica.

Non c'è dubbio che il processo di riciclaggio risulta essere migliore rispetto alla discarica e all'incenerimento, ma è molto costoso e in alcuni casi è più economico fabbricarne ex novo.

Costruzioni di strade

Oltre al riciclaggio dei rifiuti di plastica in una forma utilizzabile, l'altra alternativa è un metodo innovativo per utilizzare i rifiuti di plastica nella costruzione di strade

Diverse persone hanno cercato di utilizzare i rifiuti di plastica per la costruzione di strade (Batayneh et al.2007; Verma 2008; Menon 2016) riscaldando la plastica insieme al bitume e aggregandole agli inerti. Le strade ottenute con questo tipo di conglomerato sembrano risultare più durevoli rispetto a quelle tradizionale.

Questo metodo sembra più promettente per affrontare la gestione dei rifiuti di plastica, ma ha anch'esso qualche grave svantaggio; poiché si necessitano alte temperature per sciogliere i rifiuti di plastica insieme al bitume, vengono prodotti vari gas tossici rilasciati nell'ambiente. Quindi questo metodo è buono ma non ecologico.

Produzione di benzina

Dopo la costruzione di una strada con rifiuti di plastica, un altro metodo più innovativo e produttivo è la produzione di petrolio dai rifiuti per risparmiare risorse non rinnovabili. Vari ricercatori si sono impegnati nella generazione di prodotti petrolchimici partendo dai rifiuti di plastica e utilizzando la tecnologia della pirolisi, con prodotti finali che variano a seconda della tipologia di plastica adottata. In un reattore termico, ad alta temperatura e pressione (circa 400 C e 3,5 MPa), i rifiuti di plastica vengono decomposti in tre tipi più piccoli di specie intermedie: residuo gassoso, liquido e solido.

Questo metodo è diverso dai processi distruttivi convenzionali; porta al recupero di prodotti finali di reazione con valore aggiunto e può essere utilizzato come combustibile o come materia prima per la produzione di sottoprodotti petrolchimici.

Ne risulta il progresso della ricerca sulla pirolisi dei rifiuti di plastica e nella commercializzazione della tecnologia. Diverse aziende in diverse parti del mondo stanno valutando e adottando questa tecnologia e sicuramente in futuro emergerà come la migliore alternativa per affrontare i rifiuti di plastica grazie ai suoi significativi vantaggi.

Degradazione

Il processo, che porta a qualsiasi cambiamento fisico o chimico nelle proprietà del polimero a causa di fattori ambientali (come luce, calore, umidità, ecc.), chimici, o attività biologica, è detto degradazione del polimero.

Nella fotodegradazione, la parte nociva della radiazione solare come gli UV-B (~295–315 nm) e la radiazione UV-A (~315–400 nm) sono responsabili della fotolisi diretta del polimero che avvia la foto ossidazione.

La fotodegradazione è rispettosa dell'ambiente quando non vengono utilizzate radiazioni ad alta energia, ma risulta molto costoso.

Nel metodo di degradazione termica ossidativa, sono necessarie alte temperature e ossigeno per la degradazione del polimero, ambientalmente non accettabile.

Il processo naturale di degradazione dei materiali per mezzo di microbi come batteri, funghi e alghe è noto come biodegradazione, ampiamente accettato grazie al suo basso costo ed ecosostenibilità.

La sostenibilità ambientale dei processi produttivi dei conglomerati bituminosi

Oggi è forte la consapevolezza che i cambiamenti climatici dell'ultimo ventennio siano, in larga parte, dovuti al surriscaldamento del pianeta per effetto dell'aumento dei gas serra (CO₂, CO etc.).

Col protocollo di Kyoto furono messi in evidenza i gravi effetti sul clima dovuti al surriscaldamento del pianeta a causa dell'aumento dei gas serra e in particolare dell'anidride carbonica (CO₂) che nasce dalla combustione di carbone, petrolio e gas.

Questi motivi hanno spinto anche gli attori del processo costruttivo e manutentorio stradale (enti proprietari/concessionari ed imprese) verso l'individuazione ed applicazione di pratiche sostenibili

dal punto di vista ambientale. È noto, infatti, che per produrre conglomerati bituminosi di qualità, accanto all'utilizzo di componenti costitutivi di qualità (legante bituminoso ed aggregati lapidei) commisurati alle condizioni di esercizio (traffico, condizioni ambientali etc.) è condizione necessaria adottare un corretto protocollo di confezionamento degli stessi, nonché di posa in opera. Allora, sia la temperatura di miscelazione delle componenti costitutive, che la conseguente temperatura di stesa, rappresenta il parametro più sensibile per il governo della qualità finale del conglomerato bituminoso. In particolare, la temperatura necessaria alla miscelazione degli inerti con il legante bituminoso, materiale viscoso, si rende necessaria per abbattere la viscosità del legante e consentirne la lavorabilità. Tale energia termica produce altresì l'evaporazione di alcune componenti volatili del bitume, producendo quindi emissioni gassose nocive per l'ambiente e per la salute degli operatori. Inoltre, i costi di produzione dei conglomerati bituminosi sono strettamente legati al consumo di carburante necessario al riscaldamento degli inerti e del legante bituminoso. Quindi un abbassamento delle temperature di lavorazione, mantenendo invariate le caratteristiche meccaniche della miscela di conglomerato bituminoso, consentirebbe di ridurre i costi di produzione, ma soprattutto di ridurre le emissioni dei fumi nocivi all'ambiente e alla salute. È in questa direzione che la comunità scientifica ed industria del comparto, in ambito internazionale, si sono mosse. Per completezza di informazione si riportano di seguito i "numeri" del comparto produttivo collegato alla produzione di conglomerati bituminosi in Italia:

- 40.000.000 di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotte ogni anno per il rifacimento dei manti stradali;
- 650 impianti sparsi sul territorio; 11 raffinerie per la produzione di bitume;
- 480.000 km di rete stradale da monitorare e mantenere in perfetta efficienza;
- 42.000.000 di veicoli circolanti;
- 4.000 imprese stradali che concorrono ai lavori pubblici;
- 500.000 gli addetti che sono occupati nel settore.

Vantaggi economici ed ambientali del riciclaggio delle pavimentazioni

L'Italia, tra i principali produttori di conglomerato bituminoso, è, secondo i dati di una ricerca condotta da SITEB (Associazione Strade Italiane e Bitumi), fanalino di coda in Europa nel recupero. Ogni anno il totale recupero delle pavimentazioni stradali rimosse potrebbe portare a un risparmio di materie prime pari a 1.200 milioni di euro, senza contare la riduzione di emissioni inquinanti equivalenti a quelle generate da 3 raffinerie di medie dimensioni e all'inquinamento prodotto dalla circolazione continua di 330.000 autocarri sul territorio nazionale.

Una stima di massima valuta in circa 20 milioni di tonnellate il materiale da utilizzare e/o smaltire nei lavori di manutenzione e adeguamento della rete stradale ordinaria: una dimensione enorme, calcolata considerando una fresatura di tre centimetri di pavimentazione (ma normalmente si arriva a dieci centimetri), e stimando di intervenire solo sul dieci per cento della rete.

Le percentuali di riciclo delle pavimentazioni stradali nel nostro Paese si attestano su livelli decisamente bassi: solo il 25% del fresato disponibile viene avviato a recupero, con grave spreco di risorse economiche.

Siteb ha calcolato che il riutilizzo del 25% del fresato comporta ogni anno il minor impiego di 300.000 tonnellate di bitume vergine (riduzione del fabbisogno di petrolio) e il recupero di 7.500.000 tonnellate di inerti, equivalenti in termini economici ad un risparmio di circa 300-320 milioni di euro di sole materie prime. Riciclando il 100% delle pavimentazioni rimosse, il risparmio economico salirebbe fino a 1.200 milioni di euro/anno di sole materie prime, senza considerare tutti i vantaggi ambientali dovuti a minori importazioni di petrolio, al minor ricorso alle cave, ai minori trasporti di materie, ai minori costi di lavorazione e alle minori emissioni in atmosfera.

La dimensione economica risulta ancora più evidente se si guarda a singoli aspetti della manutenzione/gestione, come ad esempio il consumo di conglomerati bituminosi, che sulla viabilità ordinaria – secondo dati forniti dall'Associazione italiana bitume asfalto strade (Siteb) – è di circa 36/38 milioni di tonnellate ogni anno, mentre sulle autostrade è meno di 2 milioni; di questi 40 milioni di tonnellate totali la gran parte è utilizzata nella manutenzione e nei rifacimenti dei manti stradali esistenti (si stima oltre l'85 per cento) essendo ben poche le nuove realizzazioni. Parallelamente la produzione di fresati provenienti da demolizione delle pavimentazioni bituminose si attesta su circa 13 milioni di tonnellate annue, e circa un terzo di quanto si stende viene fresato annualmente, ma non più del 20/25% è reimpiegato.

RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

Con il termine RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) si intende il materiale in conglomerato bituminoso rimosso dagli strati di una pavimentazione stradale esistente da sostituire, degradata o giunta a fine vita. La demolizione e asportazione di questi strati si può eseguire utilizzando differenti macchine da cantiere, tramite le tecniche di fresatura o di scarifica, a seconda delle esigenze economiche, logistiche e operative; le fresatrici offrono la possibilità di ricavare idonei profili e pendenze trasversali della pavimentazione sottostante con rimozione selettiva dei vari strati, mentre con le scarificatrici ovvero apparecchi come escavatori, ripper o altri mezzi simili, vengono utilizzate nel caso in cui non sia necessaria la regolarità della superficie ad operazione conclusa.

Infatti, il RAP può essere riciclato e reimpiegato nel medesimo sito oppure indirizzato ad un centro di stoccaggio autorizzato per un futuro recupero o più raramente in discarica per lo smaltimento. La principale problematica legata all'impiego del fresato in miscele di nuova realizzazione è l'elevato stato di ossidazione in cui si trova il bitume in esso contenuto. Tale stato ossidativo è causato dal duplice invecchiamento che il legante subisce in opera: il primo per effetto del confezionamento e della stesa (invecchiamento a breve termine – “Short Term Aging”), il secondo prodotto dall'azione ossidante degli agenti atmosferici (invecchiamento a lungo termine – “Long Term Aging”). L'ossidazione produce una riduzione della matrice oleosa con conseguente modifica della lavorabilità e viscosità rispetto alle condizioni originarie. Il bitume contenuto nel fresato si presenta come un legante rigido che a basse temperature può presentare problemi di fessurazione termica (“Thermal Cracking”), mentre alle temperature di produzione e stesa del conglomerato può presentare problemi di lavorabilità. Trova generalmente impiego nella realizzazione degli strati della pavimentazione stradale con l'aggiunta di leganti bituminosi e/o cementizi e nella stabilizzazione dello strato di fondazione. Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del RAP sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla provenienza del conglomerato d'origine. La fase di studio della miscela, effettuata tramite il mix design, necessita di una preventiva conoscenza della granulometria e natura degli aggregati vergini e del RAP e la scelta del tipo e dosaggio di bitume vergine da impiegare considerando la presenza e riattivazione del bitume ossidato interno al RAP ed eventualmente l'uso di additivi aggiuntivi, in funzione delle proprietà finali del prodotto ricercate e della tecnica di riciclaggio adottata.

Tecniche di riciclaggio

La *tecnica del riciclaggio a caldo* prevede il confezionamento delle miscele bituminose alle temperature di produzione tradizionali, conferendo prestazioni elevate al conglomerato riciclato. Le miscele bituminose con fresato prodotte a caldo sono composte da:

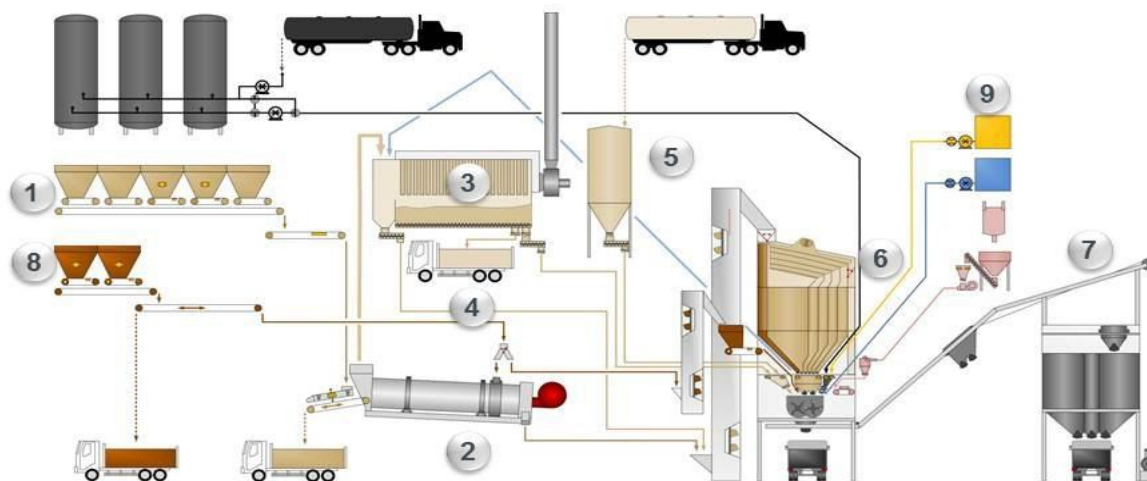
- aggregati lapidei di primo impiego, preventivamente riscaldati oltre i 150 °C;
- fresato in proporzioni variabili;
- bitume d'aggiunta tradizionale o modificato;
- ACF (Attivanti Chimici Funzionali) per la rigenerazione del bitume ossidato.

Le percentuali medie di recupero a caldo del fresato variano tra il 10% e il 50%. Questa tipologia di miscela è confezionata in impianti fissi di produzione, le cui caratteristiche sono note, grazie ad un corretto dosaggio dei componenti; la tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato, e che lo rende idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello

di usura. Gli impianti possono essere suddivisi in due categorie, a seconda che la miscelazione sia realizzata in modo discontinuo o continuo.

L'*impianto discontinuo* (Fig.4) è il tipo di impianto più diffuso in Europa, nonostante i costi elevati, poiché è dotato di un'elevata flessibilità di utilizzo che consente di ottenere un prodotto finito di qualità superiore.

Il *ciclo di produzione* comincia con il prelievo degli inerti dai cumuli tramite mezzi meccanici che vengono riversati in diverse tramogge predosatrici, ognuna delle quali contenente una specifica pezzatura. Gli aggregati sono quindi convogliati tramite il nastro collettore all'essiccatore a tamburo. Al suo interno il misto granulare viene essiccato e riscaldato alla temperatura settata per la produzione del conglomerato bituminoso. La funzione del cilindro essiccatore, oltre al raggiungimento della temperatura di miscelazione con il legante, è anche quella di eliminare eventuale umidità residua dagli aggregati. I gas prodotti in questa fase di lavorazione presentano residui di combustione e polveri che devono essere filtrati prima dell'immissione in atmosfera (in modo da recuperare il filler e trasportarlo al silo di stoccaggio) così che dal cilindro fuoriesca solo vapore acqueo.



1 COLD FEEDERS - 2 DRYER DRUM - 3 BAG FILTER - 4,8 RECYCLING FEEDING - 5 IMPORTED FILLER - 6 MIXING TOWER - 7 HOT MIX STORAGE - 9 BITUMEN TANKS

Figura 4 – Impianto per la produzione di conglomerato a caldo

Gli aggregati, riscaldati fino a 150°-160°C, fuoriescono dal cilindro e vengono trasportati mediante un elevatore a tazze nella torre di mescolamento (Fig. 5), in cui è prevista una rifelezione granulometrica degli inerti con un gruppo di vagliatura e riclassificazione. Sotto di questo, si trovano le tramogge di insilaggio a caldo delle singole pezzature. Da lì le varie pezzature possono essere

dosate a peso per mezzo della bilancia degli aggregati. Infine, quando tutti gli aggregati più grossi si trovano nella tramoggia di pesatura, il conglomerato viene trasferito al mescolatore dove vengono miscelati con additivi, bitume e filler.

Il conglomerato bituminoso prodotto viene scaricato direttamente negli automezzi o stoccato in silos provvisori.

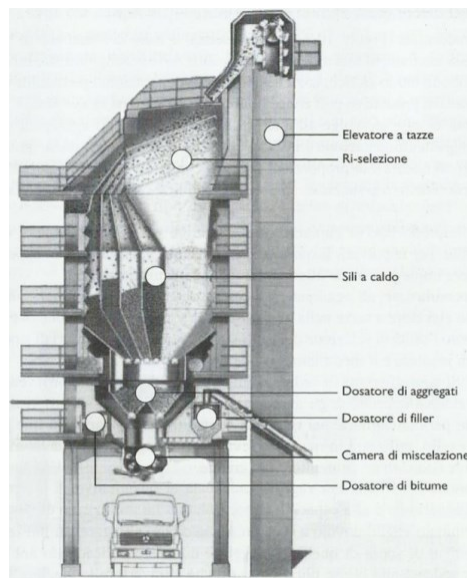


Figura 5 – Sezione della torre di mescolamento

In un impianto discontinuo che utilizza il fresato d'asfalto, in sostituzione di parte degli aggregati vergini, questo può essere riscaldato e introdotto in diversi modi:

- Tamburo essiccatore provvisto di un anello esterno: il RAP e gli inerti vergini sono introdotti contemporaneamente nel cilindro; il fresato è inserito in un apposito anello protetto mediante una paratia in acciaio, in modo tale che il fresato si riscaldi per induzione e non si provochi ulteriore ossidazione del bitume e produzione di fumi nocivi; in questo modo è possibile riciclare fino al 35% di RAP rispetto alla miscela.
- Doppio tamburo essiccatore: il RAP è riscaldato separatamente, in un cilindro a temperatura più bassa rispetto a quello dedicato agli aggregati vergini, riducendo la produzione di fumi nocivi. Questa è una soluzione molto costosa, in quanto è necessaria ulteriore energia per il secondo tamburo essiccatore, ma rappresenta la soluzione più corretta, che consente di impiegare fino al 50% di RAP
- Aggiunta del fresato freddo al piede dell'elevatore: in questo caso, il RAP viene scaricato a temperatura ambiente nell'elevatore a tazze, dove entra in contatto con gli inerti surriscaldati e si riscalderà quindi per contatto. In questo modo è possibile riciclare fresato fino a un massimo del 15-20% in peso.

- Aggiunta del fresato a freddo nella camera di miscelazione: il fresato è aggiunto alla miscela di aggregati riscaldati e introdotto nel miscelatore. Si ha così uno scambio di calore tra aggregati e fresato che causa un abbassamento della temperatura del conglomerato finale. Per questo motivo questa tecnica è la meno adatta, anche se molto usata; infatti, il conglomerato, essendo troppo freddo, non può essere steso e sarebbe necessario un ulteriore riscaldamento degli aggregati, rischiando così di danneggiare il bitume vergine o addirittura di carbonizzarlo.
- Aggiunta del fresato combinando due metodi (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel mescolatore): questa tecnica consente di riciclare alte percentuali di fresato, fino al 40%, in quanto non c'è neanche il vincolo di capienza imposto dal cilindro essiccatore.

Gli *impianti a ciclo continuo* sono più economici, semplici e richiedono meno manutenzione, ma sono meno diffusi perché eseguono una produzione continua del materiale senza la possibilità di interruzioni e variazioni di miscela da confezionare. Si differenzia da quello discontinuo per l'assenza della torre di miscelazione e si differenziano in impianti continui drum mixer e in impianti continui con mescolatore esterno. Un impianto continuo drum mixer (Fig. 6) presenta un cilindro essiccatore che funge anche da miscelatore funzionando a flussi concorrenti: gli aggregati si introducono dal lato del bruciatore e scorrono verso il lato di uscita in modo concorde con i gas di scarico. Infatti, i materiali si inseriscono a lunghezze diverse del tamburo, gli aggregati vergini a inizio cilindro, il bitume a circa un terzo dalla fine, il filler o a inizio o a fine tamburo. Se un impianto continuo vuole riutilizzare il RAP, è necessario apportare delle modifiche; le più diffuse sono:

- sistema a doppia alimentazione (dual-feed): il RAP è aggiunto nel cilindro dopo gli aggregati vergini a metà del cilindro stesso;
- sistema del cilindro nel cilindro (drum-in-drum): un cilindro più piccolo interno in cui si inseriscono gli aggregati vergini in corrispondenza del bruciatore e un cilindro esterno più grande, in cui si inserisce il fresato che si riscalda senza entrare in contatto con la fiamma, grazie al cilindro interno.

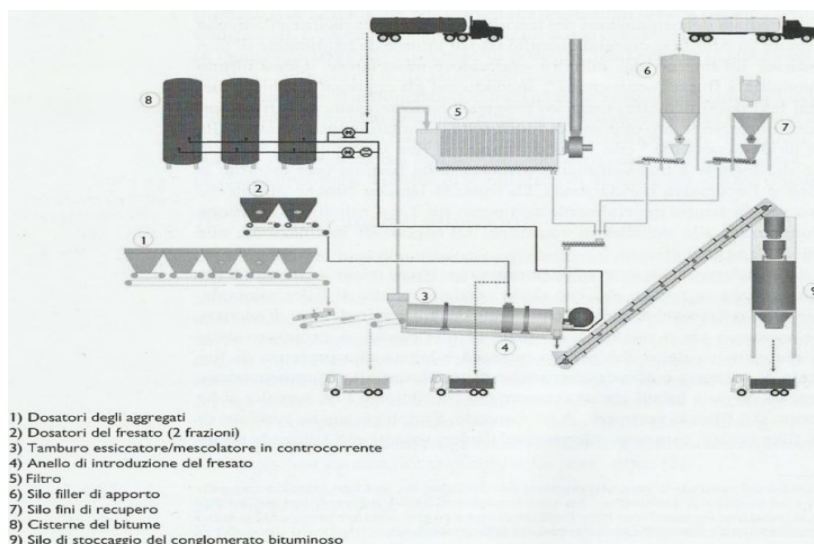


Figura 6 – Impianto di tipo continuo drum mixer

Un impianto continuo con mescolatore esterno divide le fasi di essiccazione e miscelazione avendo fisicamente un cilindro essiccatore per riscaldare gli aggregati e a valle un mescolatore per introdurre all'impasto il bitume, il filler e gli eventuali additivi. In questo impianto, il cilindro essiccatore funziona a flussi controcorrente, gli aggregati non si introducono dal lato del bruciatore e scorrono verso di esso in senso, quindi, opposto al flusso dei gas di scarico.

Il *riciclaggio a caldo in situ* è stato progressivamente abbandonato nonostante i vantaggi derivanti dall'assenza di trasporto e stoccaggio e dalla possibilità di riciclare fino al 100% del RAP. Con la tecnica della fresatura a caldo, tramite un "treno di riciclaggio", si procede a preriscaldare la pavimentazione fino ad una temperatura di $130 \div 150$ °C mediante l'impiego di pannelli radianti o a infrarossi o altri sistemi con il fine ultimo di rammollire il bitume dello strato superficiale. Bisogna considerare che questa procedura incrementa l'invecchiamento del bitume nella pavimentazione esistente e crea emissioni di vapori e polveri pericolose per la salute e per l'ambiente, oltre a necessitare di un macchinario oneroso e di difficile logistica.

Il *riciclaggio a freddo* permette di riciclare il fresato e di miscelarlo con gli aggregati vergini senza una fase preventiva di riscaldamento, ma semplicemente miscelandoli con il legante a temperatura ambiente. Nello studio della miscela a freddo, sia in situ che in impianto, è molto importante non sottovalutare il contenuto d'acqua, fondamentale per il costipamento; se necessario la si può aggiungere prima della fase di miscelazione sempre considerando la quota presente sia nel RAP umido che nell'eventuale emulsione bituminosa utilizzata come legante. Il riciclaggio a freddo presenta numerosi vantaggi, che la rendono una tecnica molto utilizzata soprattutto nella

manutenzione della pavimentazione stradale. Tra questi vantaggi, i principali sono il limitato sfruttamento delle risorse ambientali (riduzione dell'attività estrattiva), la riduzione dei costi (minore quantità di aggregati vergini necessaria), il risparmio sull'energia di produzione (in particolare quella necessaria al riscaldamento degli aggregati), la riduzione dell'impatto ambientale (assenza di fumi tossici). Il vantaggio principale di questa tecnica è che consente di riutilizzare fino al 100% di RAP rispetto alla miscela di aggregati. Come nel riciclaggio a caldo, anche in questo caso può avvenire in impianto o in sito.

Il vantaggio della produzione in impianto, anche in questo caso, è il maggior controllo della miscela, che viene studiata preventivamente. La miscela è costituita da RAP, che preventivamente è stato frantumato e frazionato in classi granulometriche; dal legante (emulsione o bitume schiumato); dal filler (per correggere la curva granulometrica); da acqua per aumentarne la lavorabilità e da cemento, per incrementarne la resistenza e favorire la rottura se si usa un'emulsione.

Nel *riciclaggio a freddo in situ*, attualmente è possibile utilizzare un macchinario unico, chiamato "riciclatrice" (Fig. 7), che fonde insieme la tecnologia delle fresatrici a freddo con quella delle macchine stabilizzatrici, permettendo di demolire lo strato e miscelare il materiale. Mentre la macchina avanza con il rullo di fresatura rotante, vengono erogati nel vano di miscelazione della riciclatrice l'acqua e l'emulsione bituminosa o bitume schiumato, mediante un sistema di pompaggio controllato da microprocessore.

Nel caso del bitume schiumato il bitume caldo (160-180 °C) si trasforma in una sostanza schiumosa quando viene miscelato in una apposita camera di espansione con una piccola quantità di acqua fredda (2 % circa). Allo stato schiumato, uno stato dotato temporaneamente di bassa viscosità, il bitume può essere mescolato con gli aggregati a temperatura ambiente e con contenuto di umidità in sito.

Questa tecnica riduce notevolmente i costi di trasporto e di stoccaggio del fresato; inoltre, comporta una riduzione dei tempi di intervento e quindi del disagio recato agli utenti della strada

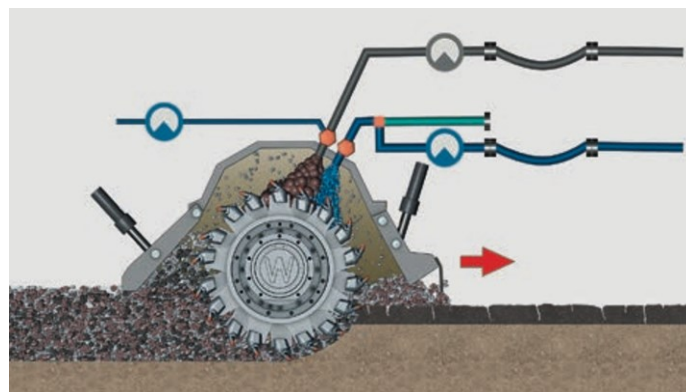


Figura 7 - Riciclatrice

Utilizzo dei rifiuti di plastica nella costruzione di strade

Si riporta, a titolo informativo, una raccolta di pubblicazioni e articoli che trattano argomenti inerenti allo studio sviluppato all'interno di questa tesi. Possono fornire alcuni termini di confronto da discutere nel capitolo di analisi dei dati desunti dalla sperimentazione di laboratorio sviluppata. Possono inoltre dare alcuni spunti per un confronto sul protocollo sperimentale adottato.

Di seguito, l'elenco generale delle pubblicazioni inserite, riguardanti il possibile utilizzo dei rifiuti di plastica nella costruzione delle pavimentazioni. In generale, la trattazione di questa tematica è abbastanza recente.

Il primo articolo citato è tratto dal IJSR - INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH - Utilization of Plastic Waste in Construction of Roads di Vatsal Patel, Snehal Popli e Drashti Bhatt, risultato di uno studio effettuato in India.

Si scopre che le strade in plastica presentano prestazioni migliori rispetto alle strade realizzate con conglomerati di tipo tradizionale.

L'utilizzo di miscele bituminose con plastiche di scarto ha dimostrato che queste migliorano la proprietà della miscela, oltre a risolvere i problemi di smaltimento. Rifiuti come bottiglie di plastica, polimeri, bicchieri, ecc. possono essere riutilizzati mediante polverizzazione o miscelazione assieme ad inerti e bitume, con qualsiasi processo di riscaldamento. Si descrivono i vari aspetti dell'utilizzo dei rifiuti di plastica nella costruzione di strade.

La plastica di scarto viene macinata e trasformata in polvere e miscelata con il bitume dal 3 al 4 %. In questo modo, aumenta il punto di fusione del bitume e ne consegue una pavimentazione che mantiene una certa flessibilità durante i periodi freddi, con conseguente maggior durata. I rifiuti di plastica triturati agiscono come un forte "legante" per il bitume che fa durare più a lungo il conglomerato.

Anche la capacità del bitume di resistere alle alte temperature aumenta: la miscela presenta le medesime caratteristiche con temperature superiori di circa 10 °C.

C'è stato un aumento sostanziale del valore di stabilità Marshall, dell'ordine di due o tre volte maggiore rispetto ai conglomerati con bitume non trattato o ordinario. Un'altra importante osservazione è che le miscele preparate utilizzando il legante trattato potrebbero resistere a condizioni di ammollo avverse sott'acqua per una maggiore durata.

Queste caratteristiche possono essere spigate mediante il Plastic Aggregate Bitumen Interaction Model (Fig. 8). La plastica triturata durante la spruzzatura sull'aggregato caldo si fonde e si diffonde sull'aggregato, dando un sottile rivestimento sulla superficie. Quando la temperatura dell'aggregato è di circa 140 °C -160°C la plastica che lo riveste rimane in uno stato rammollito. Successivamente, si aggiunge bitume caldo (160°C), che si diffonde sull'aggregato. A questa temperatura sia le plastiche rivestite che il bitume sono allo stato liquido, in grado di diffondersi facilmente nell'interfase: processo ulteriormente aiutato dall'aumento nella zona di contatto (aumento della superficie). Queste osservazioni si possono spiegare come segue: polimeri come PE, PP e PS sono idrocarburi a catena lunga. Il bitume è un complesso di asfalteni e malteni, anch'essi con catena lunga idrocarburica. Quando il bitume si miscela con l'agglomerato plastificato, una porzione di bitume si diffonde attraverso lo strato plastico e si lega con l'aggregato, mentre lo strato di plastica era già incollato fortemente con l'aggregato. Durante questo processo si costituisce una struttura tridimensionale tra le molecole di polimero e il bitume. Quindi il legame diventa più forte e la rimozione del bitume incollato diventa più difficile.

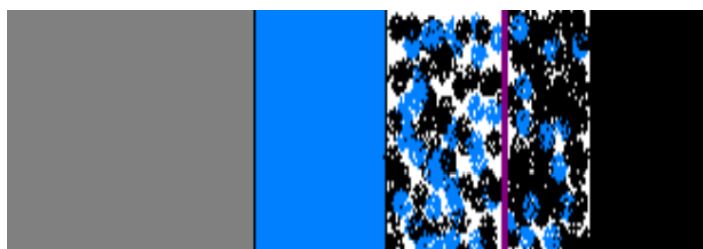


Figura 8 - Plastic Aggregate Bitumen Interaction Model

Si è adottata la seguente procedura di miscelazione a caldo:

Fase I: I rifiuti di plastica come borse, bottiglie in PE e PP vengono tagliate in una dimensione compresa tra 2,36 mm e 4,75 mm usando una macchina "grattugia". Occorre prestare attenzione affinché i rifiuti di PVC vengano eliminati prima che si proceda al processo successivo.

Fase II: gli aggregati vengono riscaldati a 165°C-170 °C e trasferiti nella camera di miscelazione. Allo stesso modo il bitume va riscaldato fino ad un massimo di 160 °C; il controllo della temperatura è molto importante.

Fase III: nella camera di miscelazione i rifiuti di plastica triturati vengono aggiunti sugli aggregati caldi durante un tempo di miscelazione costante pari a 30-45 secondi, in modo da ottenere una distribuzione uniforme, che porta ad un aspetto untuoso dell'aggregato.

Fase IV: l'aggregato rivestito di rifiuti di plastica viene miscelato con il bitume caldo.

Si sono effettuati diversi test per la caratterizzazione del conglomerato, deducendo le relative conclusioni.

1. Test di stripping: il conglomerato così preparato è stato immerso nell'acqua. Anche dopo 96 ore non c'era alcun stripping. Ciò dimostra che la miscela bituminosa in esame ha una buona resistenza all'acqua, adesione aumentata. In questo modo si riducono potenzialmente le buche del manto stradale dovute al ristagno idrico.

2. Prova di stabilità Marshall: si osserva che i valori di stabilità Marshall ottenuti erano generalmente molto più elevati del valore di stabilità Marshall ottenuto con il conglomerato bituminoso di riferimento.

3. Studio sul campo: su una lunghezza di strada di oltre 1200 km sono stati posati in diversi luoghi tra Tamil e Nadu, tratti esposti a traffico intenso, cambiamenti monsonici, forti piogge, estate calda. Le strade funzionano bene senza buche, sfilacciature e solchi.

4. Test di assorbimento d'acqua: una quantità nota di aggregato era presa, essiccata a 110 °C e raffreddata. Si determinava il peso del conglomerato, poi veniva immerso in acqua per 24 ore. Successivamente si asciugava, utilizzando panni asciutti e ripesato. L'acqua assorbita dall'aggregato è stata determinata dalla differenza di peso. È stato osservato che l'assorbimento di acqua era diminuito con l'aumento della percentuale di rivestimento di plastica sull'aggregato. Questo dimostra che il rivestimento di plastica riduce il contenuto di vuoti; pertanto, il rivestimento di plastica sull'aggregato aiuta a migliorare la qualità del conglomerato.

Riutilizzare i rifiuti di plastica per pavimentare è un esperimento che è stato condotto con successo in molti luoghi, come la masseria Kala in Kerala, a Calcutta e a Bangalore.

Non solo la strada diventa un ricettacolo di rifiuti di plastica, ma ha anche una adesione migliore. A Tirunelveli, una città a Tamil Nadu la produzione di plastica ammonta a circa 650 tonnellate/anno. Le strade disponibili sono di circa 400 km e il loro fabbisogno annuo di rifiuti di plastica è più di 600 tonnellate. Quindi il totale dei rifiuti prodotti potrebbe essere utilizzato per la posa delle strade. La vita utile della strada è superiore arrivando al doppio rispetto al conglomerato tradizionale e conseguentemente anche la manutenzione diminuisce.

Si è analizzato infine il costo per km di pavimentazione realizzata.

Dalla tabella 1 si evince come utilizzando la plastica, si necessitano minori quantitativi di bitume che portano ad un risparmio significativo in termini economici, oltre al vantaggio ambientale di produzione dello stesso e uno dei metodi migliori per lo smaltimento dei rifiuti di plastica.

Size of the road	Bitumen needed	Plastics needed	Bitumen saved
1kmX3.75	9 tonnes	1 tonnes	1 tonnes

Tabella 1 - Confronto costi

Il secondo articolo citato è tratto dall' American Journal of Engineering Research (AJER) - Reuse of Waste Plastics Coated Aggregates-Bitumen Mix Composite For Road Application – Green Method di S.Rajasekaran, Dr. R. Vasudevan , Dr. Samuvel Paulraj

I rifiuti di plastica come PE, PP e PS sono stati riversati sugli aggregati lapidei caldi e il Plastic Coated Aggregate (PCA) miscelato con il bitume. Il conglomerato ottenuto è stato utilizzato per la costruzione di pavimentazioni flessibili. È possibile utilizzare una percentuale di rifiuti di plastica (10-15%) senza separazione tra le diverse tipologie: studi dettagliati stanno andando verso questa direzione.

Sono stati effettuati vari test sulle singole parti costituenti il conglomerato sperimentato per trovare la caratterizzazione di quanto segue:

1. Utilizzo di diverse tipologie di rifiuti di plastica utilizzati per il rivestimento degli aggregati
2. Aggregato rivestito di plastica (PCA)
3. Miscela di aggregati rivestiti di plastica e bitume (Conglomerato PCA bituminoso)
4. Fresato stradale di conglomerato PCA bituminoso con plastica

Tutti i test sono stati eseguiti utilizzando procedure standard.

La maggior parte dei materiali di imballaggio utilizzati sono costituiti da PE, PP, PS. Questi materiali sono stati caratterizzati per spessore e temperatura di rammollimento (Tabella 2).

Commercial Plastic material	Nature of Plastics	Thickness μ	Softening Point Deg.C
Cup	Poly ethylene	150	100-120
Carry bag	Poly ethylene	10	100-120
Water bottle	PET	210	170-180
Cool drinks bottle	PET	210	170-180
Chocolate covers	Poly ester+Poly ethylene+metalised polyester	20	155
Parcel cover	Poly ethylene	50	100-120
Supari cover	Polyester+Poly ethylene	60	120-135
Milk Pouch	LDPE	60	100-120
Biscuit covers	Polyester+Poly ethylene	40	170
Decoration papers	BOPP	100	110
Film	Polyethylene	50	120-130
Foam	Polyethylene	NA	100-110
Foam	Polystyrene	NA	110

Tabella 2 – Proprietà fisiche dei rifiuti di plastica

Tutti questi materiali possono essere triturati e utilizzati per la costruzione della strada. Di seguito le diverse tipologie di plastica con i relativi usi comuni (Tabella 3).

Full name	Abbreviation	Examples of use
High density polyethylene	HDPE	Bottles and films
Linear low density Polyethylene	LLDPE	Film
Low density polyethylene	LDPE	Film
Polypropylene	PP	Containers, film
Polyvinylchloride	PVC	Blister packs and bottles
Polyethylene terephthalate	PET	Bottles for soft drinks, films etc.
Polystyrene	PS	Pots , thermo -Cole, trays, toys etc.

Tabella 3 - Materie plastiche per imballaggi alimentari comuni e loro usi

La procedura operativa per la creazione del conglomerato con plastica è stata la seguente.

I rifiuti di plastica, ovvero pellicole, bicchieri ecc. venivano triturate fino al raggiungimento di una dimensione pari a 2,5 mm – 4,36 mm. L'aggregato veniva riscaldato a 170°C e la plastica di scarto triturrata spruzzata sopra esso. L'entità del rivestimento è stata variata utilizzando diverse percentuali di plastica. Una percentuale più alta di plastica è stata utilizzata fino al 25% per valutare le proprietà di legame, mentre una percentuale inferiore di plastica, variabile dall'1% al 5%, utilizzata per valutare le proprietà come assorbimento e riduzione del rumore del conglomerato finale.

Si sono effettuati diversi test per la caratterizzazione del conglomerato, deducendo le relative conclusioni.

Gli aggregati rivestiti di plastica PCA ancora caldi venivano compattati in blocchi utilizzando una macchina idraulica compattatrice e successivamente fatti raffreddare. Quindi sottoposti a una prova di compressione e flessione utilizzando macchine di prova universale. I risultati sono rappresentati nella Tabella 4.

Type of Plastic	Percentage of Plastics	Bending Strength in Kg	Compression Strength Tons
Poly ethylene	10	325	250
	20	340	270
	25	350	290
Poly propylene	10	350	280
	20	370	290
	25	385	310
Polystyrene	10	200	155
	20	210	165
	25	215	170
Polyethylene Foam	10	310	250
	20	325	265
	25	335	290
Polypropylene Foam	10	340	270
	20	360	290
	25	365	310
Laminated Plastics	10	360	290
	20	385	310
	25	400	335
BOPP	10	380	300
	20	400	310
	25	410	330

Tabella 4 – Resistenza a compressione dei blocchi

I blocchi hanno mostrato una resistenza alla compressione non inferiore a 12 N/mm². Ciò dimostra che le plastiche fuse hanno una buona proprietà di adesione. L'aumento dei valori della resistenza alla compressione e della resistenza alla flessione mostra che le materie plastiche possono essere utilizzate come legante.

Inoltre, la resistenza aumenta con l'aumento della percentuale di materie plastiche utilizzate per il rivestimento. Dipende anche dai tipi di plastica utilizzati come PE, PP e PS (Tabella 3). Il seguente è l'ordine crescente di forza dei film di rivestimento PS<PE<PP<Laminati prodotti a blocchi<BOPP. Si sono effettuati test per valutare le proprietà di assorbimento e di solidità.

È stata prelevata una quantità nota di aggregato rivestito di plastica. Successivamente è stato immerso in acqua per 24 ore. Poi l'aggregato è stato asciugato con panni asciutti ed è stato determinato il peso. L'acqua assorbita dall'aggregato era determinata dalla differenza di peso. Il test è stato ripetuto utilizzando la miscela di riferimento affinché si potessero confrontare i risultati (Tabella 5).

Gli aggregati semplici esposti al ristagno d'acqua fanno penetrare facilmente acqua all'interno dei pori. Poiché l'acqua contiene sali disciolti, il sale si cristallizza e si espande all'interno dei pori.

Quindi, la proprietà di bassa solidità dipende direttamente dalla quantità di vuoti della miscela e dalla porosità degli aggregati. Questo è stato valutato conducendo un ciclo di prova agli agenti atmosferici. La perdita media di peso dell'aggregato per 5 cicli non deve superare il 12 % quando testato con solfato di sodio. Gli aggregati di riferimento e i PCA sono stati sottoposti a questi test e i risultati sono tabulati nella Tabella 5.

Stone Aggregate	Plastic content	Moisture Absorption	Soundness	AIV	ACT	LAR	Voids
Without plastic coating	0	4%	5+/- 1 %	25.4	26%	37%	4%
With plastic coating	1%	2%	Nil	21.20	21%	32%	2.2%
With plastic coating	2%	1.1%	Nil	18.50	20%	29%	1%
With plastic coating	3%	traces	Nil	17.00	18%	26%	Nil

Tabella 5 – Proprietà tecniche degli aggregati

L'aggregato rivestito in plastica non ha mostrato alcun valore per la solidità: il rivestimento delle materie plastiche riempie i pori e i vuoti presenti sulla superficie dell'aggregato. Non c'è penetrazione dell'acqua e non vi è deposizione di sale, quindi non c'è stata disintegrazione.

Anche effettuando il Test Los Angeles si è visto come gli aggregati rivestiti in plastica (PCA) mostrano una resistenza al carico di usura più elevato (Tabella 5). La resistenza aumenta con

l'aumento del rivestimento, quindi dello spessore delle materie plastiche. Questo perché il rivestimento riduce la rugosità dell'aggregato e quindi determina la riduzione di abrasione sulla superficie dell'aggregato.

Anche dai test del valore di impatto che misurano la fragilità dell'aggregato, il rivestimento dei polimeri di scarto sopra l'aggregato riduce i vuoti e le cavità d'aria presenti negli aggregati (Tabella 5). Il film formato aiuta a prevenire il cracking e anche la tenacità aumenta. Da qui, il valore d'impatto dell'aggregato rivestito di plastica è inferiore rispetto all'aggregato semplice.

Si è effettuata anche una prova di stripping.

Il valore di stripping è la determinazione della forza di legame dell'aggregato e del bitume. Viene testato immergendo il conglomerato bituminoso in acqua per 24 ore a 40°C. Quando questo è immerso in acqua, l'acqua penetra nei vuoti e nei pori dell'aggregato, provocando la desquamazione del bitume. Comporta perdita di adesione tra gli aggregati.

È stata annotata la percentuale di stripping e i risultati tabulati nella Tabella 6, nella quale si fa riferimento ad un conglomerato PCA bituminoso con contenuto di plastica al 10%.

La superficie ricoperta dal film polimerico non ha pori. Difatti il polimero fuso non solo riempie i vuoti dell'aggregato, ma si lega anche fortemente al bitume formando un legame organico, creando adesione. L'acqua non può penetrare sopra il rivestimento polimerico aggregato, quindi il distacco del bitume dal PCA era pari a zero anche dopo 96 ore, avendo quindi valori di stripping migliori.

		Plain aggregate				Plastic coated Aggregate			
		2 hrs	24 hrs	72 hrs	96 hrs	2 hrs	24 hrs	72 hrs	96 hrs
PCA+ Bitumen Mix	Stripping Value	0	0	2	5	0	0	0	0

Tabella 6 – Confronto dei valori di stripping

Dai risultati sperimentali sull'estrazione del bitume (Tabella-2) dal conglomerato PCA bituminoso si spiega la natura legante della miscela: la rimozione del bitume da parte del TCE è stato un processo lento e non tutto il bitume è stato rimosso. Il TCE non riesce a rimuovere completamente tutto il bitume. Solo dopo un ulteriore trattamento utilizzando la decalina, un solvente organico, si è riusciti a rimuovere sia il bitume che la plastica con una tempistica di almeno 30 minuti.

Sono state fatte diverse prove di estrazione con diverse percentuali di plastica all'interno della miscela (Tabella 7).

Questi dati aiutano a concludere che il legame del bitume sull'aggregato plastificato è resistente e può essere spiegato con il Plastic Aggregate Bitumen Interaction Model.

Plastic content (% by weight)	Bitumen extracted after 5 min %	Bitumen extracted after 10 min %	Bitumen extracted after 15 min %
0	96.0	98.0	99.0
0.5	63.5	88.7	92.3
0.75	63.2	86.7	90.7
1.0	61.3	76.7	83.6

Tabella 7 – Risultati prova di estrazione del bitume da miscele con diverse percentuali di plastica

Effettuando prove Marshall su conglomerati PCA bituminosi, variando tipologie e contenuto di plastiche aggiunte, sono stati ottenuti i valori di stabilità Marshall (kN), di scorrimento (mm), di rapporto Marshall (kN/mm) e la percentuale dei vuoti riempiti da bitume (Tabella 8 e 9).

% of Bitumen	% of Polymer w.r.t wt of bitumen	Type of Polymer	PCA	Marshall Value (kN)	Flow Value (X 0.25mm)	Void Percentage	Marshall Quotient kN/mm
4.5	5	PP	PCA	16	4	53	4
4.5	10	PP	PCA	20	5	55	4
4.5	5	LDPE	PCA	16	4	55	4
4.5	10	LDPE	PCA	17.5	4	55	4.38
4.5	10	PE Foam	PCA	20	4	58	5
4.5	15	PE Foam	PCA	22.5	4	56	5.63
4.5	20	PE Foam	PCA	26.5	4	56	6.62

Tabella 8 – Valori Marshall di miscele ottenute con bitumi tradizionali

% of Bitumen	% of Polymer w.r.t wt of bitumen	Type of Polymer	PMB	Marshall Value (kN)	Flow Value (x 0.25mm)	Void Percentage	Marshall Quotient kN/mm
4.5	5	PP	PMB	14.50	3	56	4.83
4.5	10	PP	PMB	17.00	3.3	62	5.15
4.5	10	PE FOAM	PMB	18.00	3.4	66	5.29
4.5	5	LDPE	PMB	15.00	3.3	62	4.55
4.5	10	LDPE	PMB	17.00	3.5	62	4.86

Tabella 9 – Valori Marshall di miscele ottenute utilizzando bitumi modificati con polimeri

Per un'efficace pavimentazione in asfalto, i valori di scorrimento dovrebbero essere compresi tra 2 e 5. I risultati ottenuti sono quindi all'interno di questo intervallo.

I vuoti riempiti di bitume (VFB) dovrebbero aggirarsi intorno al 65%, il valore osservato è circa il 58%. La riduzione è da attribuire alla riduzione dell'utilizzo della percentuale di bitume (90%) e alla riduzione dei vuoti. I dati suggeriscono anche che con l'uso di aggregati rivestiti di rifiuti di plastica, la quantità di bitume necessaria per un buon impasto può essere ridotta dello 0,5% sul peso totale.

Questo rappresenta il 10% di riduzione della quantità di bitume da utilizzare. È un buon risparmio di risorse naturali.

Da risultati empirici su tratti sperimentali, posati dal 2002 al 2012 si evince come le pavimentazioni realizzate con conglomerati PCA bituminosi risultino più performanti rispetto a quelle tradizionali. I risultati sono rappresentati in Tabella 10.

Inoltre, da un rilievo visivo della superficie della strada (procedura adottata dal Central Road Research Institute, New Delhi) non vi era alcuna formazione di buche, fessurazioni, distorsioni e imperfezioni di bordo.

Road	Year laid	Unevenness (mm /km)	Skid number	Texture Depth (mm)	Field Density Kg/M ³	Rebound Deflection (mm)
Jambulingam Street	2002	2700	41	0.63	2.55	0.85
Veerabadhra Street	2003	3785	45	0.70	2.62	0.60
Vandiyur road,	2004	3005	41	0.66	2.75	0.84
Vilachery Road, mai	2005	3891	45	0.50	2.89	0.86
Canteen Road, TCE	2006	3100	45	0.65	2.86	0.86
Plain Bitumen Road*	2002	5200	76	0.83	2.33	1.55
Tolerance Value**	-----	4000	<65	0.6-0.8	2.86	0.5-1

* - Reference road constructed with plain bitumen

** - Theoretical value for the effective performance of a good road

Tabella 10 – Dati empirici raccolti su tratti sperimentali

In definitiva, Il rivestimento di plastica sull'aggregato migliora la qualità dell'aggregato oltre al miglioramento della qualità della strada. Questa tecnologia ha contribuito a utilizzare i rifiuti di plastiche ottenute da imballaggi domestici e industriali.

Questo è già stato accettato dal Central Pollution Control Board, New Delhi che ha già rilasciato una linea guida sulla tecnica e sui suoi vantaggi.

Quindi i conglomerati PCA bituminosi consentono di:

1. Utilizzare rifiuti di plastica aggiungendone valore, evitando lo smaltimento in discarica o incenerimento e sviluppando quindi una tecnologia ecologica
2. Ridurre il fabbisogno di bitume di circa il 10%, riducendo il costo della pavimentazione
3. Aumenta la forza e le prestazioni della strada
4. Evitare l'uso di agenti anti-stripping.

Il terzo articolo citato è tratto dall' AIP Conference Proceedings - Utilization of Liquid Plastic Waste in Bitumen for Construction of Roads di D. C. Rahi, R. Chandak e Amit Vishwakarma, del dipartimento di ingegneria civile di Jabalpur e Bhopal, India.

L'obiettivo principale di questo studio di ricerca è migliorare le proprietà del bitume aggiungendo una certa percentuale di rifiuti di plastica nel bitume caldo.

Le plastiche liquefatte potrebbero essere un ottimo agente modificante del bitume.

In questo lavoro di ricerca è stato utilizzato il bitume con grado di penetrazione 60/70, con 63dmm di penetrazione, 49 °C come punto di rammollimento e duttilità di 58 cm.

La preparazione del campione è consistita in 1 kg di bitume riscaldato in forno fino a quando non si convertiva in condizioni fluide, con rifiuti di plastica aventi dimensione < 2 mm aggiunti lentamente e mescolati simultaneamente. La temperatura è stata mantenuta tra 180 °C e 200 °C. La percentuale di rifiuti plastici utilizzati è stata del 2%, 4%, 6% e 8% in peso di bitume. La miscelazione è continuata fino a quando il liquido bituminoso e plastico non risultava omogeneo.

Sono stati eseguiti i seguenti tipi di test:

1. Prova di penetrazione
2. Prova di duttilità
3. Prova del punto di rammollimento

La prova di penetrazione determina la consistenza del materiale ai fini della sua classificazione, misurando la profondità (in unità di un decimo di mm) alla quale l'ago standard penetra verticalmente sotto specifiche condizioni di carico, durata e temperatura. Più morbido è il bitume, maggiore sarà la penetrazione.

I risultati sono mostrati nella Figura 9: si illustra l'effetto della concentrazione dei rifiuti di plastica sulla penetrazione ottenuta. La profondità di penetrazione diminuisce gradualmente all'aumentare delle percentuali di plastica, qui indagate con contenuti fino all'8%. Ciò mostra che il contenuto di rifiuti di plastica ha un effetto significativo sul valore di penetrazione del bitume, con valori che diminuiscono gradualmente da 63 a 21 dmm.

S.No.	Plastic waste % by wt. of bitumen	Value of Penetration (dmm)
1	0	63
2	2	52
3	4	43
4	6	32
5	8	21

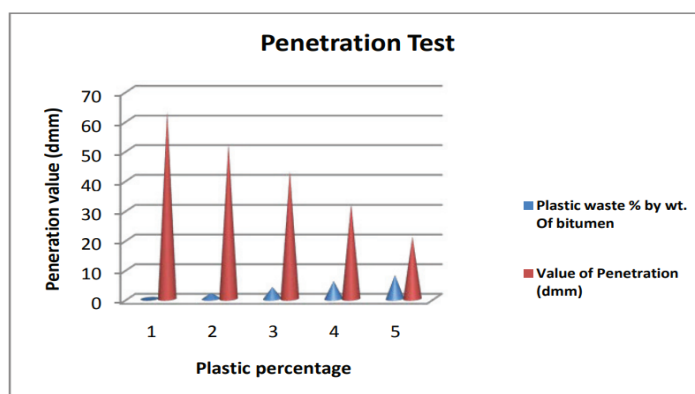


Figura 9 – Variazione dei valori di penetrazione del bitume con il contenuto di plastica

Mediante un duttilometro si indaga la duttilità, una proprietà tensile dei materiali bituminosi. È misurata dall'allungamento in centimetri di un materiale bituminoso al momento della rottura, quando le due estremità di un provino si separano.

Il test è condotto a $27 \pm 0,5$ °C e con una velocità di trazione di $50 \pm 2,5$ mm per minuto.

La figura 10 illustra l'effetto della concentrazione dei rifiuti di plastica sulla duttilità. Il valore della duttilità diminuisce man mano che la quantità di rifiuti di plastica aumenta fino all'8%. Ciò dimostra che il contenuto di rifiuti di plastica ha un effetto significativo sul valore di duttilità del bitume. Il risultato ha rilevato che con un contenuto di rifiuti di plastica da 0 a 8%, il valore di duttilità diminuisce gradualmente da 58 a 19 cm

S.No.	Plastic waste % by wt. of bitumen	Value of Ductility(cm)
1	0	58
2	2	47
3	4	36
4	6	28
5	8	19

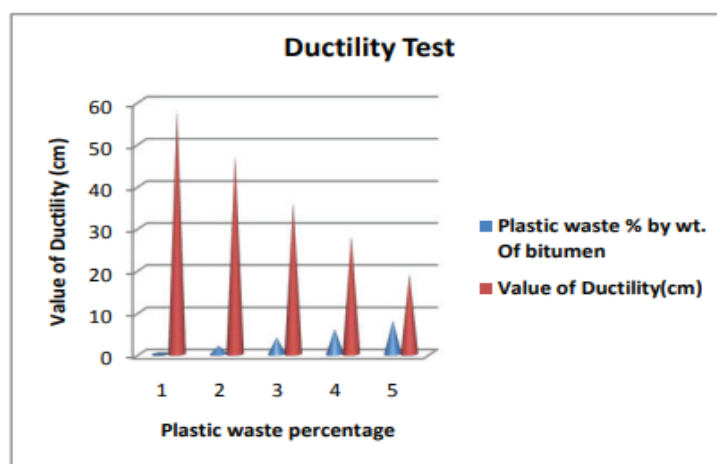


Figura 10 – Variazione dei valori di duttilità con il contenuto di plastica

Per la determinazione del punto di rammollimento si utilizza il metodo palla-anello; il punto di rammollimento dà un'idea della temperatura alla quale il bitume raggiunge una certa viscosità. Il bitume con punto di rammollimento più elevato può essere preferito in luoghi più caldi.

Nella figura 11 si illustra l'effetto della concentrazione dei rifiuti di plastica sul punto di rammollimento. Il punto di rammollimento aumenta con maggiori quantitativi di plastica fino all'8%. Ciò mostra che il contenuto di rifiuti di plastica ha un effetto significativo anche sul punto di rammollimento del bitume. Il risultato ha rilevato che con un contenuto di rifiuti di plastica da 0 all'8%, il punto di rammollimento aumenta gradualmente da 49 a 56 °C.

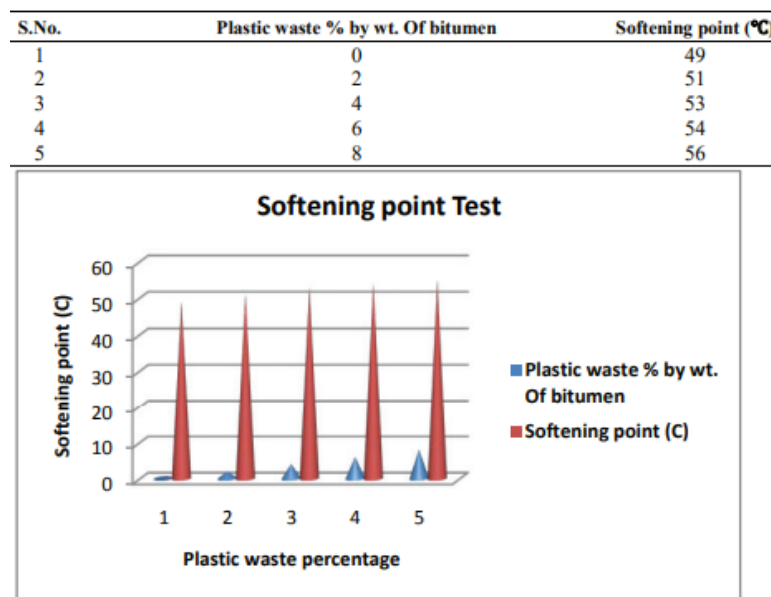


Figura 11 – Variazione del punto di rammollimento con il contenuto di plastica

Dallo studio o dall'esperimento di cui sopra, possiamo concludere che l'utilizzo di rifiuti di plastica liquidi con bitume aiuterà al miglioramento delle prestazioni stradali. L'utilizzo dell'8% di rifiuti di plastica risulta essere la percentuale ottimale per la modifica del bitume: questa percentuale potrebbe rendere la strada in grado di resistere a climi caldi, veicoli pesanti ed a ridurre l'effetto di ormaiamento. Non comporta nessun macchinario aggiuntivo e non aumenta il costo di costruzione della strada.

Il quarto articolo citato è una ricerca basata sulla revisione della letteratura inerente ai risultati di diversi studi che sono stati condotti, analizzando i danni che si verificano nello strato di pavimentazione e rilevando i materiali di scarto che non sono stati utilizzati in modo ottimale. Si tratta dell'articolo Asphalt Modified Plastic Waste To Defend Damage In Asphalt Concrete di

Mahmuda, Sumiati and Lina Flaviana appartenenti ad un dipartimento di Ingegneria civile indonesiano.

Il conglomerato bituminoso è un materiale viscoelastico sensibile alla temperatura. Le problematiche associate con la temperatura possono essere corrette usando additivi o componenti aggiuntive come gomma sintetica, lattice, pneumatici usati e altri materiali plastici.

Il polistirene (PS) ha un punto di rammollimento di 90°C, il PET ha un punto di rammollimento di 250°C e il conglomerato bituminoso ha un punto di rammollimento di circa 48°C.

Si spera che la combinazione di questi tre materiali possa essere in grado di correggere le proprietà fisiche del conglomerato bituminoso.

Si è utilizzato un bitume 80/100 e la modifica del conglomerato è stata effettuata sostituendo sul peso del conglomerato PET e PS in parti uguali. Il processo di miscelazione avviene riscaldando i rifiuti di plastica e miscela bituminosa in un luogo separato con una temperatura di 170°C. Successivamente si combinano questi due ingredienti poi si mescola con una velocità di 500 giri/min per 15 minuti, tenendo ancora il contenitore chiuso.

Sono stati prodotti conglomerati con le seguenti differenti percentuali di PET+PS: 0%; 2%, 4%, 6% e 8%.

Si è determinato l'effetto delle variazioni di temperatura sulle prestazioni della miscela, sottoponendo i provini ad una temperatura di 60°C; 70°C; 80°C per 30 minuti e una temperatura di 60°C per 24 ore prima di effettuare il Test Marshall.

Analizzando i risultati della ricerca mostrati in Tabella 11, si evince come il conglomerato modificato con rifiuti di plastica (PS + PET) ha aumentato il peso specifico, diminuendo quindi il contenuto dei vuoti.

Anche i punti di rammollimento, infiammabilità e fuoco aumentano insieme all'aggiunta di plastica (PS + PET): questo perché l'asfalto ha un punto di rammollimento di circa 48°C, mentre il polistirene (PS) ha un punto di rammollimento di 90°C e il polietilene tereftalato (PET) ha un punto di rammollimento di 250°C, rendendo quindi il conglomerato più resistente al calore.

I valori di penetrazione dell'asfalto sono diminuiti insieme all'aggiunta di (PS + PET), che rendono l'asfalto un po' rigido e con l'aggiunta di contenuti > 2% non si soddisfano le specifiche.

Testing	Asphalt	Asphalt + (PS+PET)				Spesification	
		2%	4%	6%	8%	Asphalt Pen 70/80	Asphalt Modified
Specific gravity	1,032	1,048	1,064	1,080	1,096	≥1,0	≥1,0
Penetration (mm)	87,83	72,83	67,79	59,67	46,93	60-70	Min.40
softening point (°C)	48,5	54,5	55,5	56	56,5	≥48	≥54
flash & fire point (°C)	294	297	302	317	335	≥232	≥232
Ductility (cm)	≥100	100	60	40	30	≥100	≥100

Tabella 11 – Risultati dei test sulle proprietà fisiche del conglomerato con aggiunte di PS+PET

La stabilità è la capacità di resistere alla deformazione dovute al carico del traffico senza subire cambiamenti di forma, come ondulazioni e ormaie.

Nella Figura 12, si può vedere che il valore di stabilità è aumentato insieme all'aumento del contenuto di rifiuti plastici (PS + PET) a temperature di immersione di 60°C, 70°C,80°C, per 30 minuti e 60°C per 24 ore, in salita e in discesa con contenuti maggiori del 4%, ma soddisfa comunque i valori di stabilità richiesti di almeno 800 kg.

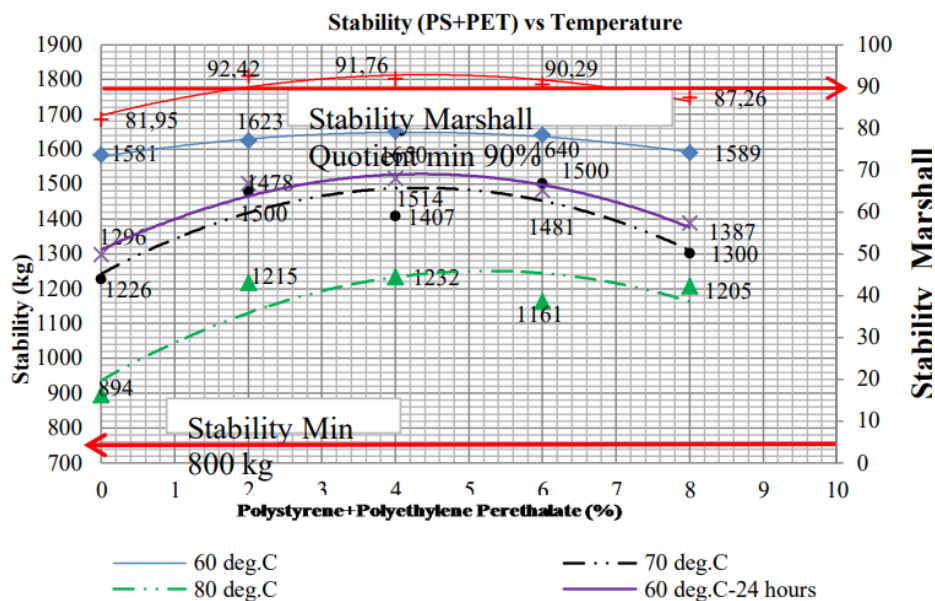


Figura 12 – Stabilità Marshall al variare della temperatura di immersione e contenuto in plastica

Nella Figura 13, si può vedere che il valore dello scorrimento è diminuito insieme alla diminuzione della temperatura d'immersione e la crescente sostituzione di parte del conglomerato con rifiuti di plastica (PS+PET).

Il valore di scorrimento è fissato tra 2-4 mm: bassi valori di scorrimento fanno diventare la miscela rigida e fragile.

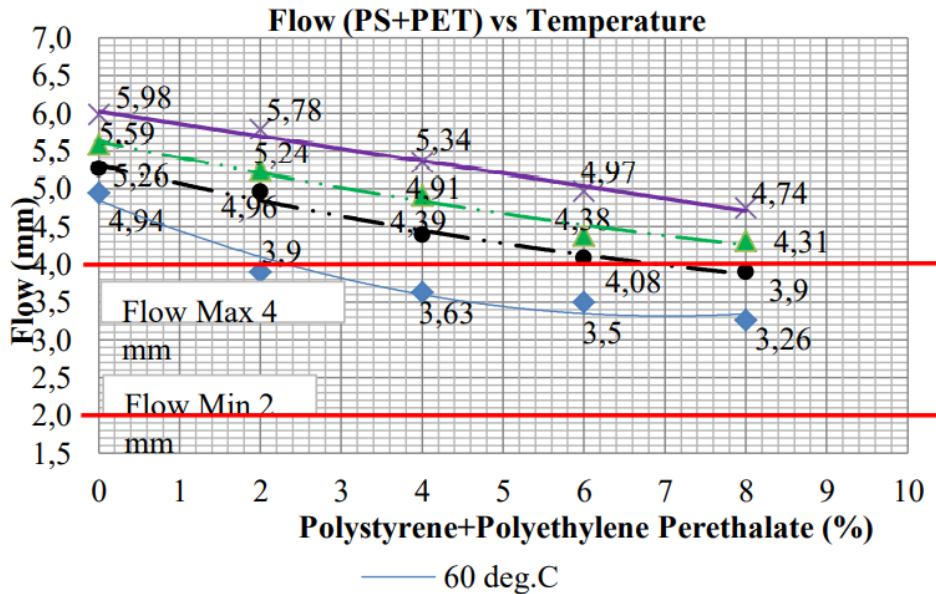


Figura 13 – Scorrimento Marshall al variare della temperatura di immersione e contenuto in plastica

I vuoti riempiti di legante (VFA) sono definiti come la percentuale del volume compreso tra gli aggregati occupata da bitume. Un valore più alto significa che più vuoti nella miscela vengono riempiti con bitume, valori troppo alti causano bleeding. Valori VFA troppo piccoli renderanno la miscela meno impermeabile all'acqua e all'aria perché lo strato di bitume che ricopre l'inerte è sottile comportando una miscela poco duratura e ossidabile più facilmente.

I risultati dello studio in Figura 14 mostrano che il conglomerato di riferimento non soddisfa i requisiti minimi. I rifiuti di plastica che vengono sostituiti non aggiungono valore alla miscela, devono essere limitati al 2% per ottenere un impasto impermeabile, durevole e non facilmente ossidabile.

I vuoti nella miscela degli aggregati VMA sono definiti come il rapporto percentuale tra il volume compreso tra gli elementi lapidei (vuoti e bitume) e il bitume totale della miscela. I fattori che influenzano il valore di VMA includono la gradazione della curva granulometrica, il contenuto di bitume e il metodo di compattazione. In Figura 15 si può notare che la sostituzione di una porzione di conglomerato con plastica fino al 2%, fa diminuire il valore VMA, mentre aumenta con sostituzioni > 2%.

Figura 15 – Valori VMA al variare del contenuto di plastiche

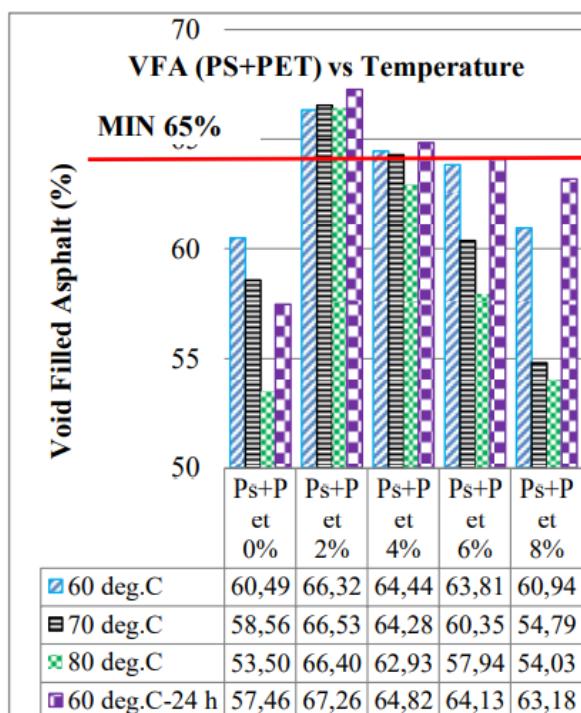
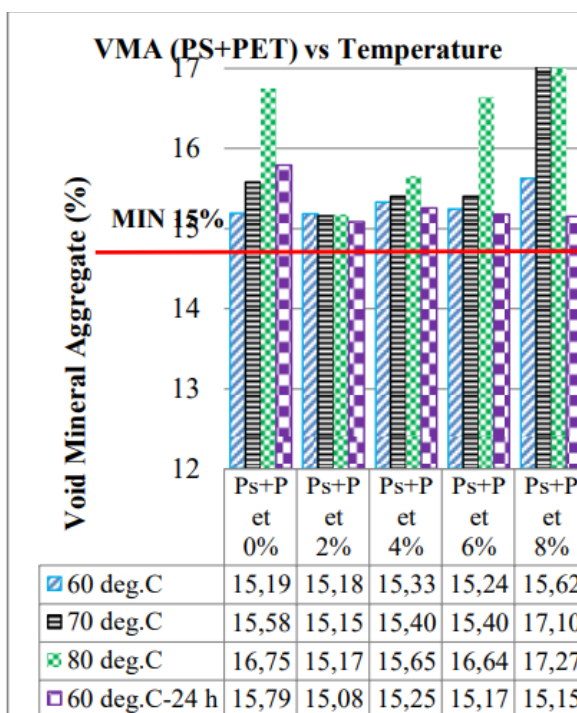


Figura 14 – Valori VFA al variare del contenuto di plastiche



Sulla base dei risultati della ricerca che è stata svolta, si può concludere che i rifiuti di plastica possono sostituire il 2% in peso del conglomerato bituminoso per ottenere risultati soddisfacenti. Dai risultati del test Marshall si nota come una sostituzione del 2% sul peso del conglomerato avente un contenuto ottimale di bitume del 5,6%, può prevenire danni alla pavimentazione: deformazioni, ondolazioni, ormaimenti.

CAPITOLO 2

Programma sperimentale

Nel seguente capitolo si va ad illustrare il lavoro sperimentale eseguito presso le strutture del Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche, dipartimento di eccellenza 2E-LAB. Nello specifico, partendo dagli obiettivi della ricerca, si identificano le miscele di conglomerato bituminoso confezionate a caldo utilizzate nella sperimentazione, si riportano i materiali costitutivi e le caratteristiche, descrivendo quindi l'organizzazione del piano sperimentale. Successivamente, si descrivono tutte le apparecchiature di laboratorio utilizzate con le relative procedure di prova. Si sottolinea che nella fase operativa del lavoro sperimentale, ci si avvale di una procedura esecutiva standardizzata per svolgere ogni operazione al fine di ottenere risultati rappresentativi.

Obiettivi e miscele realizzate

Il presente lavoro sperimentale ha come obiettivo principale la possibilità di utilizzare plastiche provenienti da RSU all'interno dei conglomerati bituminosi tradizionali a caldo. Si cercherà di analizzare l'influenza che la plastica ha sulle caratteristiche volumetriche e meccaniche del conglomerato bituminoso, deducendola dai risultati delle prove sperimentali che si andranno ad effettuare.

Si procederà quindi ad uno studio di fattibilità d'inserimento della plastica all'interno della miscela bituminosa, indirizzando l'organizzazione e il proseguo sperimentale per step, alla stregua dei risultati ottenuti dalle prime sperimentazioni.

Si sottolinea che per tutte le miscele di conglomerato bituminoso da confezionare a caldo si identifica come destinazione funzionale di impiego lo strato di binder, detto anche strato di collegamento, di una pavimentazione stradale di tipo flessibile

Considerando gli stessi protocolli di prova per tutte le miscele, il lavoro sperimentale trattato intende:

- valutare la fattibilità d'impiego delle plastiche provenienti da rifiuti solidi urbani per la realizzazione di conglomerati bituminosi innovativi, mediante un mix design volumetrico
- chiarire se il protocollo di confezionamento e miscelazione adottato fornisca risultati accettabili, valutando le varie difficoltà operative dovute alla natura innovativa della sperimentazione

- analizzare il comportamento della miscela bituminosa tradizionale di riferimento, relazionandola ai conglomerati sperimentati mediante analisi volumetriche, di modulo elastico, di rottura
- analizzare l'andamento delle proprietà fisiche e meccaniche del conglomerato bituminoso con plastiche da RSU, al variare del contenuto percentuale in peso delle stesse sulla miscela
- analizzare l'andamento delle proprietà fisiche e meccaniche del conglomerato bituminoso con plastiche da RSU, al variare delle tipologie di plastiche adottate
- valutare se le temperature adottate per il confezionamento della miscela siano in grado di sciogliere le plastiche e come queste si presentano all'interno dei provini, dopo aver effettuato un taglio agli stessi, analizzandole visivamente e tramite prove di estrazione per valutarne la parte fusa assieme al bitume. Operazioni atte a dedurre se un non completo scioglimento, possa generare punti di discontinuità che evolvano in comportamenti fragili.
- tramite il mix design volumetrico, valutare se l'utilizzazione delle plastiche possa corrispondere ad una riduzione dell'uso del bitume o degli aggregati vergini

Per questa ricerca sperimentale, in definitiva si sono confezionati 16 miscele di conglomerato bituminoso a caldo, corrispondenti a 13 tipologie, differenti per temperatura di miscelazione, contenuto percentuale di plastiche, contenuto percentuale di bitume.

Difatti sono stati confezionati 108 provini con diametro 100 mm e 6 provini con diametro 150 mm, realizzando 8 provini da 100 mm per ciascuna tipologia di miscela presente in Tabella 12, ripetendo per le 3 miscele con percentuale di bitume al 4,2% un secondo impasto, che hanno permesso il confezionamento di 4 provini da 100 mm e 2 provini da 150 mm cada miscela.

RIFERIMENTO
190°C - 1% - A
170°C - 0,5% - B
170°C - 0,5% - C
170°C - 1% - A
170°C - 1% - B
170°C - 1% - C
170°C - 2% - A
170°C - 2% - B
170°C - 2% - C
170°C - 2% - A - 4,2%
170°C - 2% - B - 4,2%
170°C - 2% - C - 4,2%

Tabella 12 – Tipologie di miscele bituminose confezionate

Le sigle nei nomi delle miscele di progetto riportate in Tabella 12 identificano le seguenti caratteristiche:

- “170 °C” e “190 °C” identificano la temperatura di preriscaldamento e di miscelazione adottata
- “RIFERIMENTO”, “0,5%”, “1%”, “2%” identificano le percentuali sul contenuto di plastica adottato, con la miscela di riferimento che indica un conglomerato bituminoso tradizionale a caldo
- “A”, “B”, “C” identificano la tipologia di plastica adottata
- “4,2%” identifica le miscele con contenuto di bitume del 4,2%, rispetto alle altre in assenza di designazione che presentano un contenuto pari al 4,9 %

Si utilizza il medesimo piano operativo per tutte le procedure e le prove eseguite in laboratorio su ogni miscela di conglomerato bituminoso di progetto confezionata a caldo, seguendo precisi protocolli di prova. Con questo si garantisce una omogeneità del lavoro svolto permettendo di ottenere risultati confrontabili e veritieri, minimizzando gli errori associabili alla natura empirica delle operazioni.

Materiali

Nel seguente paragrafo si riportano tutti i materiali impiegati nello studio e confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso a caldo in laboratorio, per svolgere il lavoro sperimentale trattato in questa tesi. Nello specifico, si suddividono in:

- tre tipologie di plastiche;
- bitume vergine normale 70/100;
- aggregati vergini (aggregato grosso di calcare, sabbia di calcare e filler);

Si illustrano le caratteristiche e le proprietà di ogni materiale e le curve granulometriche degli aggregati. Tutti i materiali risultano conformi ad un uso stradale secondo le normative vigenti italiane ed europee.

Plastiche

Le plastiche indagate sono di tre differenti formati:

- A. Plastiche in foglia
- B. Plastiche estruse
- C. Plastiche densificate



Figura 16 – Plastiche in foglia



Figura 17 – Plastiche estruse



Figura 18 – Plastiche densificate

Bitume

Per la realizzazione dei provini di conglomerato bituminoso è stato usato un bitume con classe di penetrazione 70/100. Questi valori esprimono la profondità di penetrazione di un ago standardizzato dopo 5 secondi, applicando un carico costante di 100 grammi, in un campione di bitume condizionato a 25°C. Il bitume si ottiene a partire dalla distillazione frazionata del petrolio, processo in cui le componenti del grezzo vengono separate sfruttando le diverse temperature di ebollizione: le frazioni più volatili si dispongono in alto nella colonna frazionata, mentre il residuo che si dispone in basso è utilizzato per produrre il bitume primario, dopo un ulteriore frazionamento sottovuoto.



Figura 19 – Bitume di classe 70/100 utilizzato nella sperimentazione

Aggregati lapidei vergini

Gli aggregati lapidei rappresentano la fase solida dei conglomerati bituminosi ed in particolare quelli vergini, qui impiegati, risultano materiali di primo impiego quindi non provenienti da riciclo o recupero. Si ricavano da depositi naturali oppure da operazioni su cava di prestito, questi ultimi preferiti ai primi poiché con la superficie spigolosa forniscono migliori prestazioni meccaniche. La prima fase operativa eseguita in una cava di prestito consiste nell'estrazione del materiale con l'ausilio di macchine da cantiere o di esplosivi, in seguito, si esegue la fase di frantumazione della roccia per ottenere le diverse classi granulometriche e di vagliatura per il successivo stoccaggio degli aggregati in cumuli e il loro trasporto in impianti di produzione del conglomerato bituminoso e in cantiere.

Possono essere classificati in base alla loro origine in *naturali*, *artificiali* e *riciclati*.

Indipendentemente dall'origine degli aggregati, le norme tecniche di Capitolato Anas fanno riferimento a specifiche caratteristiche che le rendono idonee in funzione dello strato per il quale verranno adottate.

Le proprietà che caratterizzano un aggregato sono:

- *geometriche* (granulometria, forma, tessitura, grado di angolarità);
- *fisiche* e meccaniche: massa volumica, resistenza e durabilità;
- *chimiche*: composizione mineralogica e adesione con il bitume.

Le caratteristiche geometriche principali sono:

- *Granulometria*: distribuzione delle dimensioni delle particelle che influenza tutte le principali proprietà delle miscele. La granulometria viene studiata mediante analisi granulometrica tramite setacciatura (setacci con dimensioni standardizzate riportate nella norma UNI EN 13043). In generale si cerca di ottenere la massima densità tramite una distribuzione granulometrica assortita, che contenga quindi una presenza proporzionata di granuli con dimensioni diverse.
- *Forma dei granuli*: Sono da evitare forme del granulo allungate e appiattite, privilegiando forme sferiche o cubiche. La forma influenza il livello di incastro intergranulare nelle miscele e, parzialmente, l'aderenza superficiale. Per la valutazione del coefficiente di appiattimento si ricorre ad uno speciale vaglio a barre. Le norme tecniche di Capitolato Anas impongono limitazioni con particolare riferimento a quest'ultimo parametro.
- *Tessitura superficiale*: Influenza le caratteristiche superficiali di aderenza e viene misurata tramite prove di attrito radente. Inoltre, influisce parzialmente anche l'incastro intergranulare e la quantità di bitume necessaria per un corretto ricoprimento dei granuli.

- *Grado di angolarità*: identifica la presenza di spigoli vivi.

Per quanto riguarda la caratterizzazione fisica degli aggregati si determina invece valutando le caratteristiche dell'aggregato grosso in termini di resistenza alla frammentazione, all'usura e ai cicli di gelo-disgelo (durabilità). Tali caratteristiche vengono determinate tramite la *prova "Los Angeles"* (UNI EN 1097- 2)

Infine, gli aggregati possono essere classificati anche dal punto di vista chimico analizzando alcune specifiche proprietà:

- *Pulizia e qualità dei fini*: si verifica la presenza di minerali argillosi o organici che possono compromettere l'adesione con il bitume o causare suscettibilità all'acqua.
- *Composizione mineralogica*: natura compositiva degli aggregati che influenza le caratteristiche meccaniche e di durabilità.

Gli aggregati si identificano in funzione della loro dimensione, si definisce una designazione d/D (D è il diametro massimo e d il diametro minimo) mediante aperture dei setacci che variano in funzione della normativa considerata. Seguendo la norma UNI EN 13043, qui adottata, si classificano come:

- aggregati grossi, aventi dimensione massima $D < 31,5$ mm e dimensione minima $d > 4$ mm;
- aggregati fini, aventi dimensione massima $D < 4$ mm e dimensione minima $d = 0$ mm;
- filler, coincide con il passante al vaglio da 0,063 mm.

Nell'ambito della presente indagine sono stati impiegati i seguenti aggregati lapidei nelle seguenti classi dimensionali, così definite nella pratica ingegneristica, anche denominate frazioni granulometriche:

- Pietrisco calcareo 12/25
- Pietrisco calcareo 8/12
- Graniglia calcarea 4/8
- Sabbia calcarea 0/6
- Filler Omya

Il calcare è una roccia sedimentaria la cui composizione dipende dalle condizioni di formazione (chimica, organica o clastica). La componente principale è rappresentata dal minerale calcite, ovvero

carbonato di calcio CaCO_3 . Le cave per l'estrazione del calcare si trovano prevalentemente lungo i corsi d'acqua o laghi e, di conseguenza, si trovano distribuite più o meno in tutte le regioni italiane.

Per ricavare la curva granulometrica, si procede con un' *analisi granulometrica*: si prende una quantità rappresentativa del campione di materiale ottenuto mediante quartatura e posto all'interno di un forno a 105°C allo scopo di eliminare l'acqua interstiziale presente, per un tempo necessario al raggiungimento di un peso costante.

Mediante la procedura per via secca si pesa il materiale e poi si dispongono i setacci uno sopra l'altro, con diametro dei fori decrescente, versando sulla sommità il campione di materiale da analizzare.

I vagli vengono poi allestiti su una struttura vibrante che scuote vigorosamente gli aggregati attraverso un movimento "rotatorio-sussultorio" per 15 minuti per favorire il passaggio del materiale; ovviamente la pezzatura più grossolana si depositerà più in alto e contemporaneamente i più fini filtreranno invece più in profondità.

Al termine di questa fase si pesa il materiale raccolto in ciascun setaccio, iniziando da quello con trama più fine e misurando così il "trattenuto parziale" che poi viene espresso in percentuale, utilizzando la seguente formula:

$$T_i = 100 \cdot \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i}$$

dove:

- T_i = trattenuto parziale in percentuale;
- P_i = passante all'i-esimo setaccio.
- N = numero dei setacci

In seguito, si determinano i "trattenuti cumulativi" (%) nei vari setacci in relazione a tutta la quantità di materiale trattenuta nel setaccio i-esimo ed in quelli che lo precedono ($j=1, 2, \dots, i$), espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione.

$$TC_i = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^i P_j}{\sum_{i=1}^N P_i}$$

Vengono infine calcolati i "passanti cumulativi" nei vari setacci calcolati come complemento a cento dei trattenuti cumulativi, espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione:

$$PC_i = 100 - TC_i$$

L'analisi granulometrica per via umida invece prevede un'ulteriore operazione iniziale in cui un quantitativo preciso di materiale viene posto in un setaccio con maglie di dimensioni pari a 0,063 mm, per poi essere lavato sotto l'acqua corrente per il tempo necessario in cui avviene il completo dilavamento del filler e la completa disgregazione dei grumi. Al termine di questa operazione, che corrisponde al ritorno alla limpidezza dell'acqua che passa attraverso il setaccio, il residuo viene posto in forno ad asciugare alla temperatura di 105 °C per poi effettuare una setacciatura "tradizionale" come descritta in precedenza.

Il risultato dell'analisi granulometrica viene poi elaborato attraverso la creazione delle *curve granulometriche*, grafici in cui sull'asse delle ascisse si riportano le aperture dei vari setacci in scala logaritmica, mentre sulle ordinate le percentuali di passante cumulativo.

La curva granulometrica ottenuta per ogni frazione granulometrica viene in seguito utilizzata per la realizzazione della curva di progetto e quindi per la definizione della distribuzione granulometrica della miscela di aggregati, definita come la percentuale in peso relativa alle diverse pezzature.

Pietrisco calcareo 12/25

Campione	Pietrisco 12-25			
	Trattenuti (g)	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
Setaccio/crivello (mm)	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	72,8	5,0	5,0	95,0
16	400,3	27,4	32,4	67,6
12,5	604,8	41,4	73,8	26,2
8	354,1	24,3	98,1	1,9
4	11,1	0,8	98,9	1,1
2	5,3	0,4	99,3	0,7
1	0	0,0	99,3	0,7
0,5	0	0,0	99,3	0,7
0,25	0	0,0	99,3	0,7
0,125	0	0,0	99,3	0,7
0,063	0	0,0	99,3	0,7
FONDO	11	0,8		

Tabella 13 – Analisi granulometrica pietrisco 12/25

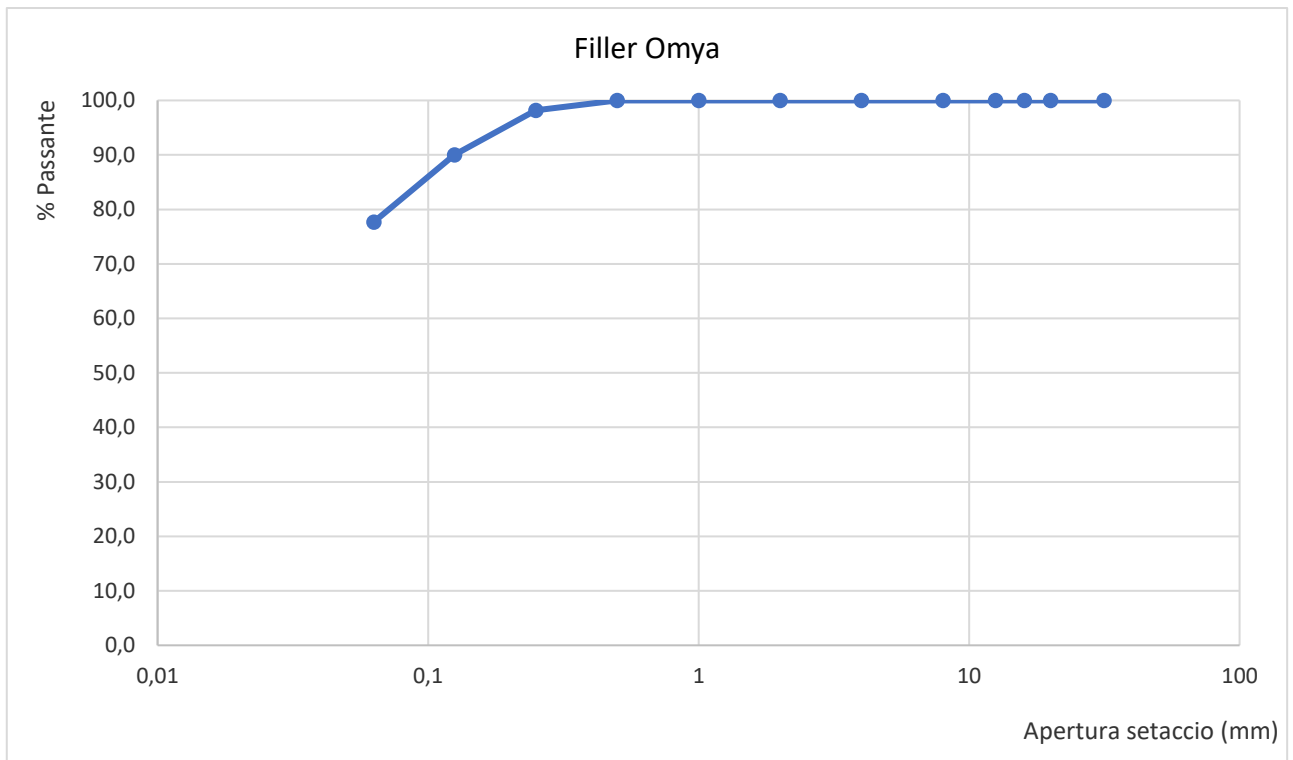


Figura 20 – Curva granulometrica pietrisco 12/25



Figura 21 – Pietrisco calcareo 12/25 utilizzato per il confezionamento delle miscele

Pietrisco calcareo 8/12

Campione	Pietrisco 8-12			
Setaccio/crivello (mm)	Trattenuti (g)	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	800,1	71,6	71,6	28,4
4	305,3	27,3	98,9	1,1
2	0	0,0	98,9	1,1
1	0	0,0	98,9	1,1
0,5	0	0,0	98,9	1,1
0,25	0	0,0	98,9	1,1
0,125	0	0,0	98,9	1,1
0,063	0	0,0	98,9	1,1
FONDO	11,9	1,1		

Tabella 14 – Analisi granulometrica pietrisco 8/12

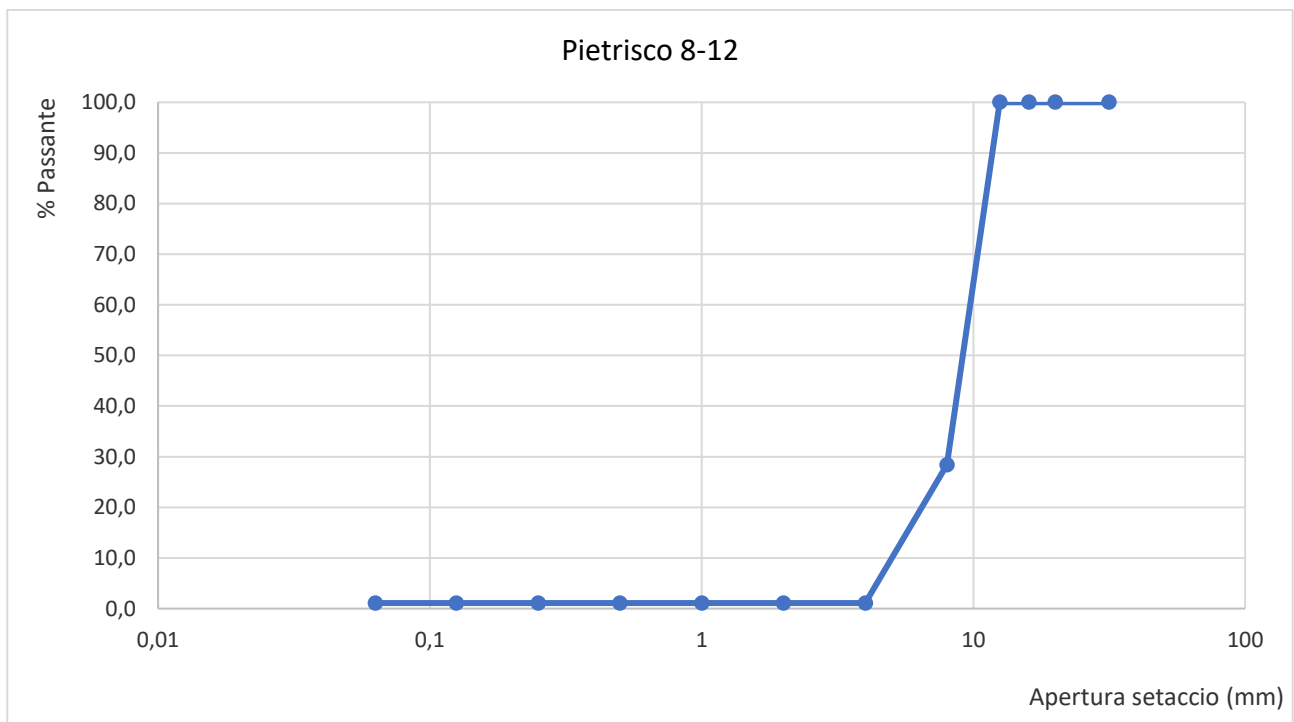


Figura 22 – Curva granulometrica pietrisco 8/12



Figura 23 – Pietrisco calcareo 8/12 utilizzato per il confezionamento delle miscele

Graniglia calcarea 4/8

Campione	Graniglia 4-8			
	Trattenuti (g)	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
Setaccio/crivello (mm)				
	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	0	0,0	0,0	100,0
4	684,8	77,0	77,0	23,0
2	169,2	19,0	96,0	4,0
1	19,6	2,2	98,2	1,8
0,5	0	0,0	98,2	1,8
0,25	0	0,0	98,2	1,8
0,125	0	0,0	98,2	1,8
0,063	0	0,0	98,2	1,8
FONDO	16,2	1,8		

Tabella 15 – Analisi granulometrica graniglia 4/8

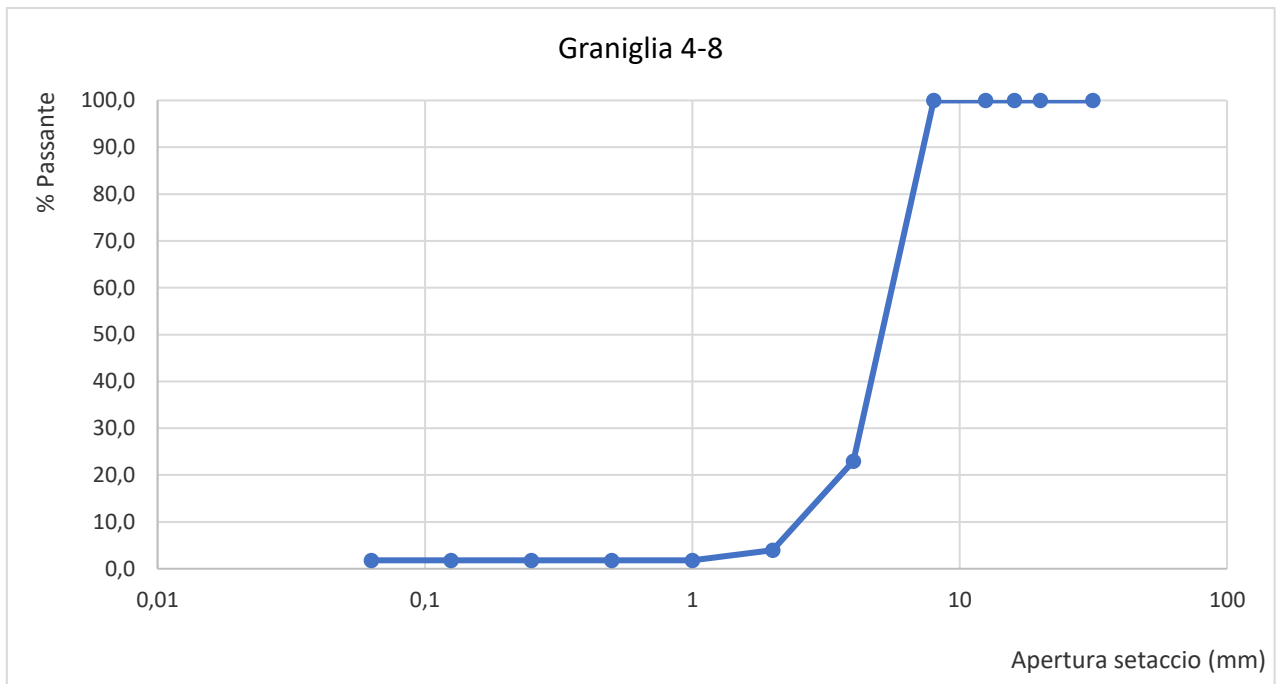


Figura 24 – Curva granulometrica graniglia 4/8



Figura 25 – Graniglia calcarea 4/8 utilizzata per il confezionamento delle miscele

Sabbia calcarea 0/6

Campione	Sabbia 0-6				
	Setaccio/crivello (mm)	Trattenuti (g)	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
		0	0,0	0,0	100,0
	31,5	0	0,0	0,0	100,0
	20	0	0,0	0,0	100,0
	16	0	0,0	0,0	100,0
	12,5	0	0,0	0,0	100,0
	8	0	0,0	0,0	100,0
	4	30,2	2,6	2,6	97,4
	2	288,7	24,9	27,5	72,5
	1	321,6	27,8	55,3	44,7
	0,5	187,1	16,2	71,5	28,5
	0,25	81	7,0	78,5	21,5
	0,125	74,4	6,4	84,9	15,1
	0,063	54	4,7	89,6	10,4
FONDO		120,2	10,4		

Tabella 16 – Analisi granulometrica sabbia 0/6

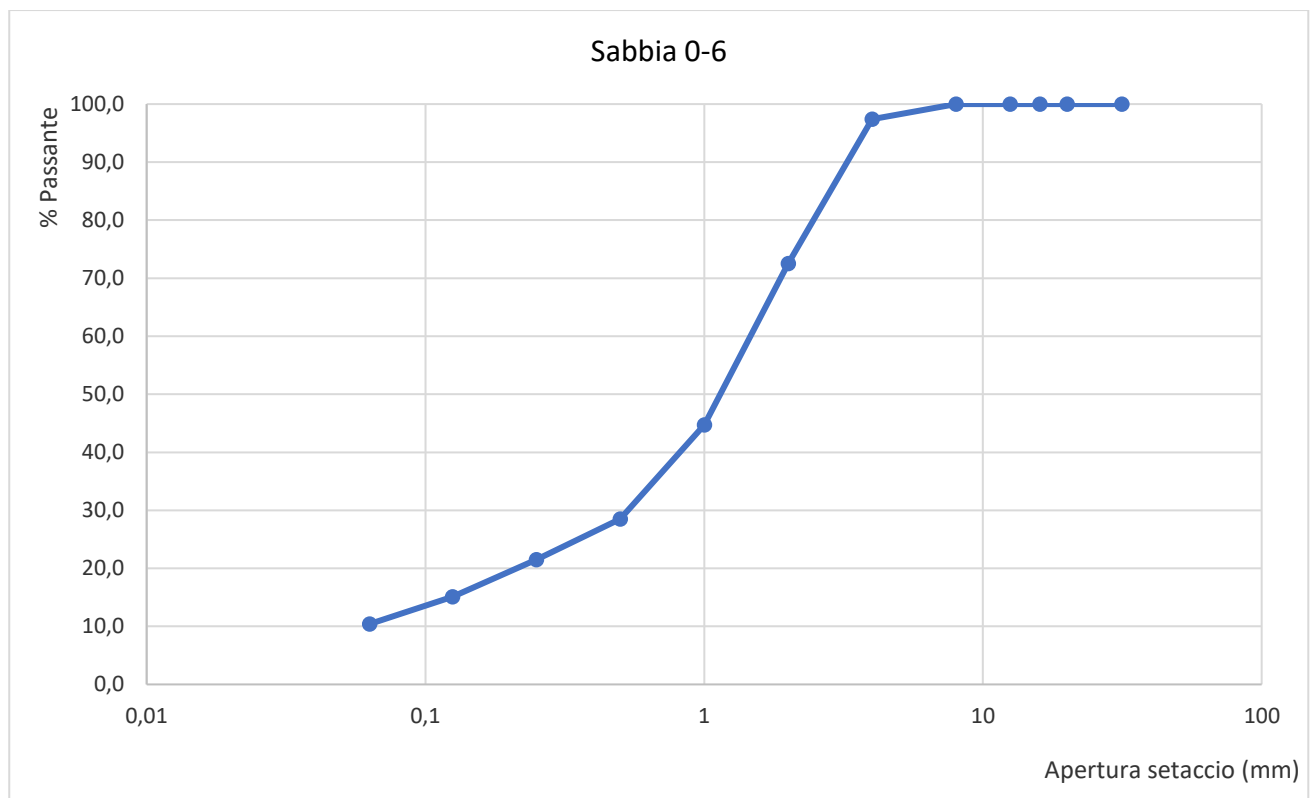


Figura 26 – Curva granulometrica sabbia 0/6



Figura 27 – Sabbia calcarea 0/6 utilizzata per il confezionamento delle miscele

Filler

Il filler garantisce la formazione del mastice, cioè il prodotto ottenuto dall'unione di filler e bitume, il quale permette di evitare fenomeni di trasudamento, di prevenire lo spogliamento e di migliorare la stabilità delle miscele.

Campione	Filler Omya			
	Trattenuti (g)	% parz. trattenuto	% trattenuto	% passante
Setaccio/crivello (mm)				
	0	0,0	0,0	100,0
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	0	0,0	0,0	100,0
4	0	0,0	0,0	100,0
2	0	0,0	0,0	100,0
1	0	0,0	0,0	100,0
0,5	0	0,0	0,0	100,0
0,25	4,5	1,8	1,8	98,2
0,125	21	8,2	10,0	90,0
0,063	31,5	12,3	22,3	77,7
FONDO	200	77,8		

Tabella 17 – Analisi granulometrica Filler Omya

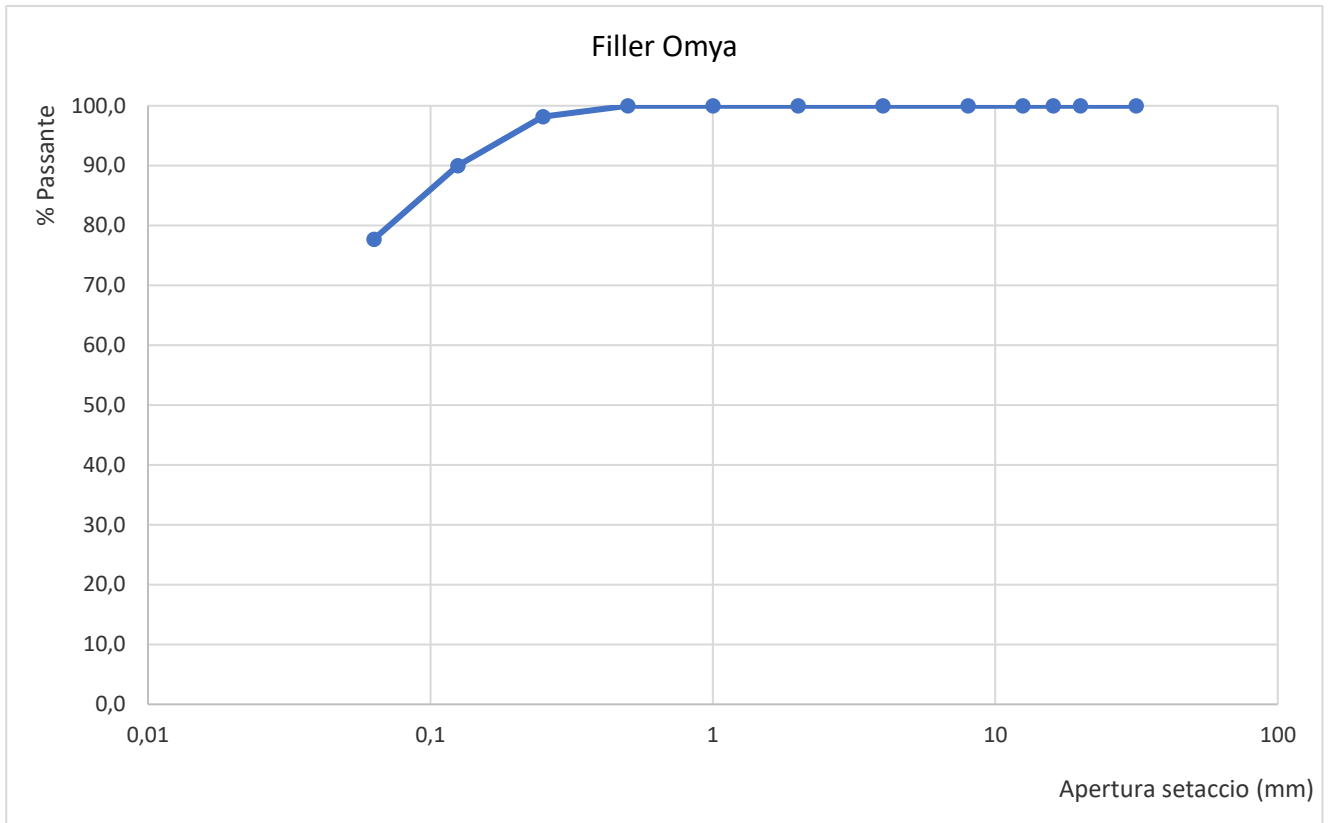


Figura 28 – Curva granulometrica Filler Omya



Figura 29 – Filler Omya utilizzato per il confezionamento delle miscele

Apparecchiature e protocolli di prova

Nel seguente paragrafo si illustrano tutte le apparecchiature di laboratorio adoperate durante il lavoro sperimentale svolto e i relativi protocolli di prova. Inizialmente, si riportano le curve granulometriche di progetto e le ricette delle tre miscele di conglomerato bituminoso da confezionare a caldo, alle quali successivamente si è dosata l'aggiunta delle plastiche da RSU sul peso degli aggregati; si espone la procedura operativa eseguita in laboratorio per il confezionamento dei provini, quindi di preparazione della ricetta e miscelazione dei materiali costituenti, sui quali si andranno ad eseguire le seguenti prove:

- Massa volumica apparente procedura C (con paraffina) e contenuto di vuoti;
- Modulo di rigidezza a trazione indiretta (ITSM);
- Resistenza a trazione indiretta (ITS) e calcolo del CT-index;
- Estrazione del legante sui frammenti residui della prova di trazione indiretta;
- Metodo di prova di flessione semi-circolare (SCB)

Curva granulometrica di progetto

Si riportano le specifiche tecniche di Capitolato Speciale di Appalto Anas relative allo strato di binder, strato di riferimento del presente lavoro sperimentale, che indicano un fuso granulometrico e un intervallo della percentuale di bitume da impiegare riferita al peso della miscela per un conglomerato bituminoso da confezionare a caldo (Tabella 18).

Capitolato ANAS Binder		
Apertura [mm]	P _{min}	P _{max}
20	100	100
16	90	100
12,5	66	86
8	52	72
4	34	54
2	25	40
0,5	10	22
0,25	6	16
0,063	4	8
% bit (sul mix)	4,1	5,5

Tabella 18: Fuso capitolato ANAS

Conoscendo le curve granulometriche delle singole pezzature utilizzate e considerati i limiti del fuso granulometrico, si è potuta determinare la curva di progetto e ricavare le percentuali in peso delle frazioni granulometriche da inserire. Si è deciso di utilizzare il mix granulometrico, riferito al peso degli inerti, descritto in Tabella 19.

Setaccio	Singole Pezzature				
	[mm]	Sabbia 0-6	Graniglia 4-8	Pietrisco 8-12	Pietrisco 12-25
31,5	100	100	100	100	100
20	100	100	100	95	100
16	100	100	100	67,6	100
12,5	100	100	100	26,2	100
8	100	100	28,4	1,9	100
4	97,4	23	1,1	1,1	100
2	72,5	4	1,1	0,7	100
1	44,7	1,8	1,1	0,7	100
0,5	28,5	1,8	1,1	0,7	100
0,25	21,5	1,8	1,1	0,7	98,6
0,125	15,1	1,8	1,1	0,7	90,2
0,063	10,4	1,8	1,1	0,7	77,6
Binder	39,00%	19,00%	8,00%	32,00%	2,00%

Tabella 19 – Granulometria della miscela

La granulometria della miscela rientra nel fuso ANAS per un binder.

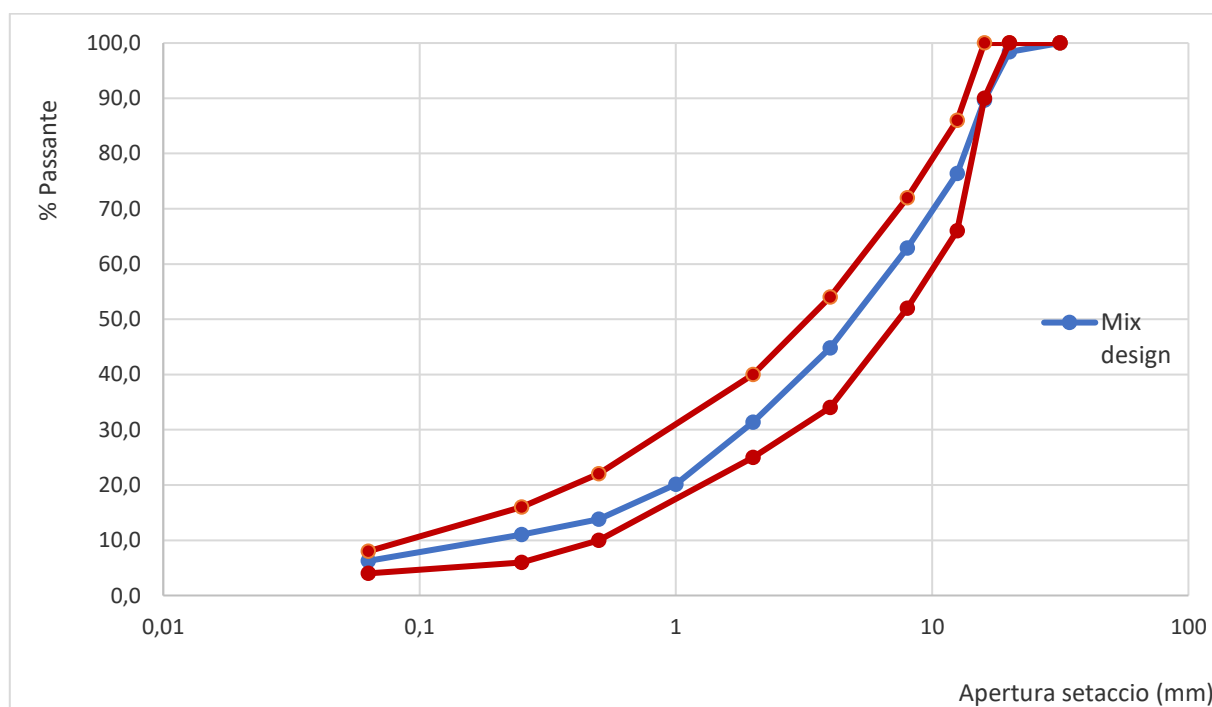


Fig. 30 – Curva granulometrica della miscela e fuso ANAS per il binder

La percentuale di bitume adottata è stata del 4,9 % e del 4,2% per le diverse miscele realizzate, entrambe riferite alla percentuale in peso della miscela, trascurando sullo stesso il peso delle plastiche adottate.

Le plastiche sono state dosate con percentuali calcolate sul peso degli aggregati lapidei.

Inoltre, per quanto concerne le plastiche in foglia sono state immerse in acqua (Fig. 31) per valutare la quantità di materiale galleggiante e quella deposita sul fondo.

Dalla prova è risultato:

- frazione galleggiante: 90%
- frazione andata a fondo: 10%



Figura 31 – Plastiche in foglia immerse in acqua

Per l’inserimento nel conglomerato bituminoso si è deciso di utilizzare solo la parte galleggiante (dopo essiccazione).

Le altre tipologie sono state inserite all’interno del conglomerato senza ulteriori procedimenti preliminari.

Attraverso una bilancia di precisione si dosa il materiale seguendo la ricetta, predisponendolo in teglie per ogni singola frazione granulometrica. Si riportano nelle seguenti tabelle 20, 21 e 22, le 3 differenti ricette utilizzate durante la sperimentazione per il confezionamento dei provini.

Binder				
Mix 4 provini da 100 mm + 2 provini da 150 mm				
%bit	4,2%	667,8	Massa provini 100 [g]	1150
Pezzatura	% risp. Aggregati	m [g]	N° Provini	4
Sabbia 0/6	39,0%	5940,6	Massa provini 150 [g]	5400
Graniglia 4/8	19,0%	2894,1	N° Provini	2
Pietrisco 8/12	8,0%	1218,6	Totale impasto	15900
Pietrisco 12/25	32,0%	4874,3		
Filler Omya	2,0%	304,6	Totale aggregati	15232,2
	100%	15900		
% plastica	0,5%	1,0%	2,0%	
grammi plastica	79,5	159,0	318,0	

Tabella 20 – Mix Design miscele per confezionare 4 provini da 100mm + 2 provini da 150 mm, con bitume dosato al 4,2%

Binder				
Mix 8 provini 100 mm				
%bit	4,2%	407,4	Massa provino [g]	1150
Pezzatura	% risp. Aggregati	m [g]	N° Provini	8
Sabbia 0/6	39,0%	3624,1	Totale impasto	9700
Graniglia 4/8	19,0%	1765,6		
Pietrisco 8/12	8,0%	743,4	Totale aggregati	9292,6
Pietrisco 12/25	32,0%	2973,6		
Filler Omya	2,0%	185,9		
	100%	9700		
% plastica	0,5%	1,0%	2,0%	
grammi plastica	46,5	92,9	185,9	

Tabella 21 – Mix Design miscele per confezionare 8 provini da 100mm, con bitume dosato al 4,2%

Binder				
Mix 8 provini 100 mm				
%bit	4,2%	407,4	Massa provino [g]	1150
Pezzatura	% risp. Aggregati	m [g]	N° Provini	8
Sabbia 0/6	39,0%	3624,1	Totale impasto	9700
Graniglia 4/8	19,0%	1765,6		
Pietrisco 8/12	8,0%	743,4	Totale aggregati	9292,6
Pietrisco 12/25	32,0%	2973,6		
Filler Omya	2,0%	185,9		
	100%	9700		
% plastica	0,5%	1,0%	2,0%	
grammi plastica	46,5	92,9	185,9	

Tabella 22 – Mix Design miscele per confezionare 8 provini da 100mm, con bitume dosato al 4,9%

Miscelazione e compattazione

Gli aggregati lapidei ed il filler, posti precedentemente all'interno di teglie, vengono riscaldati in stufa per 3 ore a 170 °C, in modo da eliminare l'eventuale umidità residua e per raggiungere la corretta temperatura di miscelazione. Il bitume viene posto in forno, alla stessa temperatura, per 1 ora in modo da renderlo liquido: importante non prolungare questo periodo affinché non si verifichi ossidazione. Insieme agli inerti, vengono solitamente poste in forno dal principio del ciclo di cottura previsto anche le fustelle, affinché raggiungano anch'esse la temperatura prevista del conglomerato ed evitino dannosi shock termici durante la successiva fase di compattazione.



Figura 32 – Forno utilizzato nel laboratorio, con vista del materiale posto al suo interno

Per tutti gli impasti si adotta la stessa procedura di miscelazione, mediante l'utilizzo di una macchina miscelatrice:

- aggregati caldi immessi nella camera di miscelazione con le pareti previamente riscaldate a 170 °C;
- aggiunta delle plastiche;
- prima miscelazione per un tempo fissato di 120 secondi;
- inserimento del bitume
- seconda miscelazione per altri 120 secondi;
- inserimento del filler
- terza miscelazione per ulteriori 180 secondi.

La macchina miscelatrice utilizzata, come visionabile in Fig. 33, è costituita principalmente da una tazza di miscelazione metallica atta a contenere i materiali da miscelare e da un corpo motore che aziona la rotazione di tre pale metalliche miscelatrici. La tazza di miscelazione viene chiusa in sommità durante le operazioni ed è collegata al corpo principale mediante dei perni che ne permettono la rotazione per lo svuotamento; è possibile riscaldarla. È presente una console comandi per impartire i movimenti della tazza, avviare e arrestare la miscelazione, gestire la velocità di rotazione delle pale e la temperatura di riscaldamento della tazza di miscelazione. L'impastatrice viene accesa e impostata alla temperatura di progetto 170 °C almeno 60 minuti prima della fase di miscelazione, tempo necessario per il riscaldamento della tazza di miscelazione.



Figura 33 – Miscelatrice utilizzata in laboratorio

Il bitume viene aggiunto con la tecnica della pesata per differenza poiché la quantità è superiore a quella necessaria, per ovviare al bitume che rimane attaccato alle pareti del contenitore. Questa tecnica consiste nel posizionare la lattina senza tappo contenente il bitume sopra una bilancia da laboratorio ed impostare lo zero sulla stessa. Successivamente, ad ogni versamento del bitume nella tazza di miscelazione si ripesa la lattina, leggendo così un peso negativo che corrisponde al peso introdotto in miscela, ripetendo l'operazione fino al raggiungimento del dosaggio di bitume previsto. Al termine della miscelazione, viene prelevata la quantità di conglomerato bituminoso (circa 1150 g) necessaria per la realizzazione di un provino di diametro 100 mm e altezza circa 60 mm compattato con 120 giri di pressa giratoria. Nel caso di provini da 150 mm si prelevano 5400 g. Si procede in modo analogo per ogni provino, versando il materiale all'interno di teglie che vengono poi trasferite

in forno per ulteriori 30 minuti a 170 °C, prima di procederne e al confezionamento.

Successivamente, si estrae la fustella riscaldata dal forno e la si riempie, nel minor tempo possibile, con il materiale della singola teglia mediante un imbuto.



Figura 34: Materiale versato all'interno della fustella mediante imbuto

Questa fase prevede che si inserisca nella fustella una piastra di base ed un dischetto di carta/filtro per evitare l'adesione del conglomerato alla piastra stessa. Successivamente si versa il materiale, si cerca di appiattirne la superficie superiore, si inserisce un altro dischetto di carta contrassegnato con la nomenclatura del provino e poi si pone un'altra piastra in sommità.

Una volta che la fustella è pronta, viene velocemente trasportata alla pressa giratoria, composta da un telaio, dove viene inserita la fustella, una zona motore, un pistone di carico e una base rotante, dalla postazione di estrazione del provino compattato oltre che da un sistema di sensori attraverso i quali è possibile l'acquisizione e il controllo dei dati. Il funzionamento si basa sull'indurre uno stato di addensamento del materiale contenuto all'interno della fustella sottoponendolo ad una continua riorganizzazione interna degli aggregati, applicando una pressione verticale costante tramite il pistone di carico mentre la fustella ruota attorno al proprio asse, inclinato di 1.25 ° rispetto alla verticale.

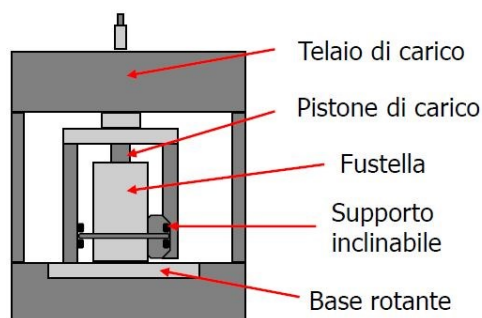


Figura 35: Schema pressa giratoria

La rotazione eccentrica della fustella crea sollecitazioni normali e tangenziali con direzione variabile, così da simulare più fedelmente le azioni dei rulli utilizzati nel caso reale. In questa ricerca è stato impostato il metodo di compattazione a numero di giri imposti e settati i seguenti parametri:

- Pressione: 600 KPa (prevista da norma);
- Diametro della piastra: 100 mm e 150 mm;
- Numero di giri: 120.

Una volta iniziata la prova, il pistone inizia a scendere fino ad imprimere la pressione preimpostata, raggiunta la quale i sostegni laterali si alzano facendo inclinare la fustella, per poi iniziare a ruotare. Raggiunto il numero di giri preimpostato, il macchinario va in modalità “self-parking”: il pistone risale dando, perciò, la possibilità di estrarre la fustella con all’interno il provino compattato.

Si conclude quindi il confezionamento del provino con l’estrazione dello stesso mediante un pompaggio manuale effettuato con martinetto idraulico, che lo solleva dal basso verso l’alto, provocandone la fuoriuscita.

Figura 37: Operazione di rimozione del provino dalla fustella mediante martinetto idraulico



Figura 36: pressa giratoria

Determinazione delle proprietà volumetriche

Le caratteristiche prestazionali dei conglomerati bituminosi sono influenzate dai rapporti volumetrici tra le diverse fasi che compongono il provino: fase solida, ovvero aggregati, legante e gassosa, ovvero aria. Ogni granulo di aggregato è ricoperto da bitume, che in parte penetra nei pori superficiali (bitume assorbito) e in parte invece va a costituire il bitume effettivo, che forma una sottile pellicola di ricoprimento. I vuoti finali del conglomerato sono dati dal volume intergranulare occupato dall'aria e possono essere determinati in diversi modi.

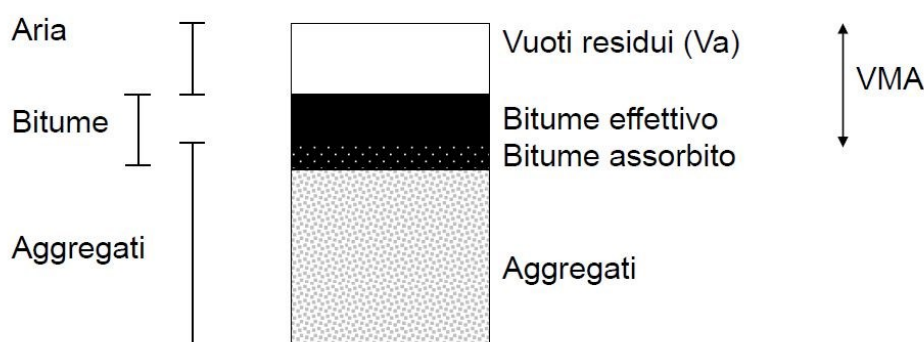


Figura 38 - fasi presenti all'interno del conglomerato e loro rapporto

Massa volumica massima (UNI EN 12697-5)

La massa volumica massima di una miscela di conglomerato bituminoso rappresenta la sua massa per unità di volume priva dei vuoti di aria ad una prefissata temperatura. In riferimento alla norma UNI EN 12697-5, la massa volumica massima ρ_m è stata determinata mediante il procedimento C (procedimento matematico):

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

dove:

- ρ_m = massa volumica massima [kg/m³ oppure g/cm³]
- p_a = percentuale di aggregati nella miscela [m/m]
- ρ_a = massa volumica apparente degli aggregati [kg/m³ oppure g/cm³]
- p_b = percentuale di legante nella miscela [m/m]
- ρ_b = massa volumica del legante a 25°C [kg/m³ oppure g/cm³]

Massa volumetrica apparente (UNI EN 12697-6)

La massa volumica apparente di un provino di conglomerato bituminoso compattato è la massa per unità di volume considerando i vuoti di aria ad una prefissata temperatura di prova. Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, si eseguono in laboratorio due protocolli di prova dettati dalla norma europea UNI EN 12697-6 relativo alla determinazione della massa volumica apparente: il procedimento C detto procedimento con provino sigillato e il procedimento D detto procedimento geometrico.

La prova eseguita con il *procedimento del provino sigillato* si svolge in laboratorio mediante le seguenti fasi operative:

- si identifica il peso di ogni provino mediante una bilancia di precisione;
- si procede a sigillare ogni provino impiegando la paraffina. Questa a temperatura ambiente si presenta allo stato solido, per impiegarla bisogna portarla al suo stato liquido con l'ausilio di una piastra riscaldante da laboratorio sotto cappa di aspirazione. In seguito, si riveste totalmente con la paraffina liquida la superficie di ogni provino, riempiendo i fori superficiali presenti;
- si identifica il peso di ogni provino rivestito con la paraffina mediante la bilancia di precisione;
- si determina la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova attraverso l'ausilio della Tabella 23 sotto riportata, mediante un termometro da laboratorio digitale con sonda fissa a penetrazione in acciaio inossidabile;

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m ³	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m ³
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tabella 23 – Massa volumica dell'acqua in funzione della temperatura

- si identifica il peso in acqua di ogni provino rivestito con la resina alloggiandolo su un cestello interno ad un bidone pieno di acqua e collegato alla bilancia di precisione impiegata prima. Per una corretta pesata idrostatica, il provino deve essere completamente sommerso e la lettura

si effettua a stabilizzazione avvenuta dell'acqua, ovvero quando sulla bilancia non risulteranno più oscillazioni sulla pesata.

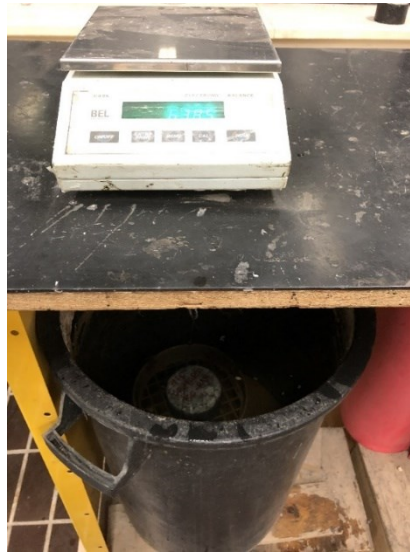


Figura 39 – Pesata idrostatica effettuata nel laboratorio

Eseguita la procedura sopraccitata per ogni provino, si determina la massa volumica apparente mediante la seguente relazione:

$$\rho_{b,sea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}}$$

dove:

- $\rho_{b,sea}$ è la massa volumica apparente sigillata [g/cm^3];
- m_1 è la massa del campione secco [g];
- m_2 è la massa del campione sigillato a secco [g];
- m_3 è la massa del campione sigillato in acqua [g];
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [g/cm^3];
- ρ_{sm} è la massa volumica del materiale sigillante alla temperatura di prova [g/cm^3].

La prova eseguita con il *procedimento geometrico* prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco. La massa volumica geometrica dei provini cilindrici si calcola come:

$$\rho_{b,geom} = \frac{m_1}{h \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^6$$

dove:

- $\rho_{b, geom}$ = massa volumica apparente del provino [g/cm^3]
- m_1 = massa del provino [g]
- h = altezza media del provino su quattro misurazioni [cm]
- d = diametro del provino [cm]

Volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)

La determinazione delle proprietà volumetriche relative alle miscele studiate, quindi del contenuto dei vuoti residui sui provini compattati, seguendo il protocollo di prova contenuto nella norma UNI EN 12697-8 e considerando la massa volumica apparente del metodo sigillato ritenuta più attendibile, si calcola come:

$$V_{m, sea} = \frac{\rho_m - \rho_{b, sea}}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- $V_{m, sea}$ è il volume o contenuto dei vuoti residui espresso in percentuale;
- ρ_m = massa volumica massima [g/cm^3]
- $\rho_{b, sea}$ = massa volumica apparente sigillata a 25°C [g/cm^3]

In accordo ai requisiti di accettazione delle miscele impiegate come binder, contenute nel capitolato Anas, i conglomerati dovranno avere elevata resistenza meccanica cioè capacità di sopportare senza deformazioni permanenti le sollecitazioni trasmesse dalle ruote dei veicoli. I provini dovranno essere compattati mediante giratoria ad un numero di giri totali (N3) dipendente dalla tipologia della miscela e dalla tipologia del legante. La verifica della % dei vuoti dovrà essere fatta a tre livelli di n° giri: N1 (iniziale), N2 (medio) e N3 (finale); il numero dei giri di riferimento con le relative percentuali dei vuoti sono:

n° giri	Bitume TQ	% vuoti Vm UNI EN 12697-8
N1	10	11-15
N2	100	3-6
N3	180	≥ 2

Tabella 24 – Prescrizioni capitolato Anas sul contenuto di vuoti residui per strato binder

Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)

La misurazione del modulo di rigidezza a trazione indiretta ITSM è stata effettuata utilizzando l'apparecchiatura NAT, acronimo di "Nottingham Asphalt Tester". Questo dispositivo applica un carico di compressione lungo una direzione e tramite dei trasduttori posti diametralmente ruotati di 90° rispetto alla direzione di carico, ne misura la deformazione.

Le modalità di sperimentazione, effettuata mediante questa apparecchiatura, vengono stabilite dalla normativa UNI EN 12697-26 che impone una deformazione preimpostata e prevedendo che la prova venga effettuata su almeno due diametri, l'uno girato di 90° rispetto l'altro.

I parametri della prova sono regolati mediante un software, attraverso il quale si possono settare: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso $2 \mu\text{m}$) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson e la temperatura della prova.

La prova sarà composta essenzialmente da due fasi: la prima in cui un sistema di gestione effettua una taratura attraverso degli impulsi di condizionamento, che servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione; la seconda invece prevede la prova vera e propria.

Il modulo di rigidezza del campione viene determinato attraverso l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, resa lecita dalle specifiche condizioni di prova e assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Inoltre, esso è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson.

Nella figura 41 si riporta lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il provino durante la prova.

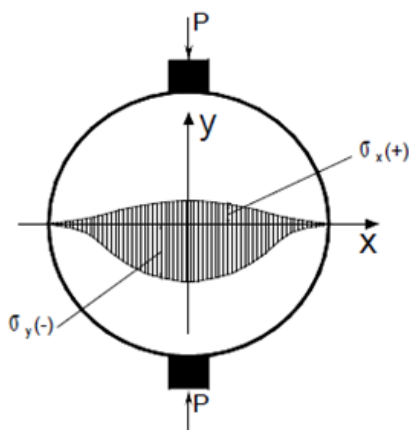


Figura 40 - Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova di modulo a trazione indiretta

In corrispondenza del diametro orizzontale le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) e y (compressione) sono calcolate dalle seguenti espressioni:

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

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

dove:

- P = carico applicato;
- D = diametro del campione;
- T = spessore del campione.

Dalla teoria dell'elasticità lineare, in funzione della distribuzione delle tensioni, è possibile determinare le deformazioni di un elemento sottoposto a uno stato tensionale biassiale. La deformazione orizzontale ϵ_x dell'elemento è:

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

dove:

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

Dalle espressioni delle tensioni medie viste prima, è possibile ricavare la deformazione orizzontale Δ dei provini, moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione:

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

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

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

Inoltre, sulla base della forma dell'onda di carico impostata, il software fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore denominato come "AF", acronimo di Adjustment Factor. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a $0,60 \pm 0,10$, viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

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

dove:

- $ITSM'$ = il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- k = il rapporto tra le aree;
- $ITSM$ = il modulo di rigidezza in MPa.

Per garantire la correttezza della prova si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibili; in particolare i tempi di picco devono essere compresi in un range con tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $5,0 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- *temperatura*: la formula per il calcolo del modulo è valida solo per temperature inferiori a 25°C essendo il modulo uguale sia a trazione che a compressione; in questa sperimentazione le prove sono state eseguite a 20°C , con i provini posti a questa temperatura all'interno di una camera climatica prima dello svolgimento della prova di modulo, per un tempo sufficiente a raggiungerla anche al proprio interno, con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di $0,4^\circ\text{C}$
- *rise-time (tempo di picco)*: la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico, a causa della natura viscoelastica del bitume. In particolare, il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante per raggiungere il valore massimo

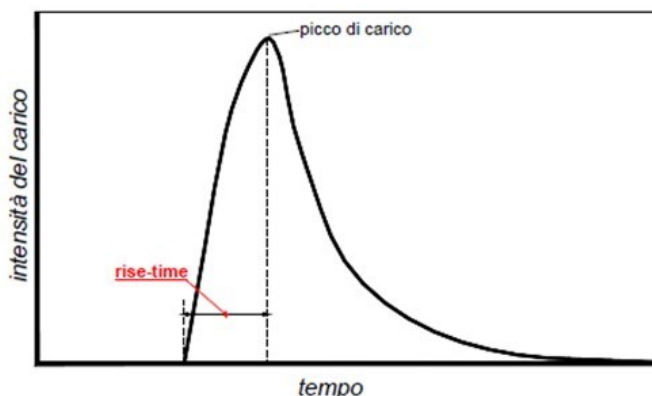


Figura 41 – Rappresentazione del rise-time all'interno della curva intensità di carico-tempo

- *deformazione orizzontale imposta*: le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova, stante il comportamento non lineare dello stesso
- *numero di colpi di condizionamento iniziale*: per ottenere valori di rigidità affidabili è necessario scegliere un numero di colpi sufficiente al condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si registrano tempi di prova più brevi, ma allo stesso tempo diminuisce l'affidabilità delle misurazioni. Secondo il BSI (British Standard Institute) è applicabile un numero di colpi di condizionamento pari a 5, anche se da indagini sperimentali si è visto che questo valore non sia da ritenere sufficiente.

Nella sperimentazione effettuata i parametri sopra elencati sono stati fissati con i seguenti valori:

- *temperatura*: 20°C
- *rise-time*: 124 ms.
- *deformazione imposta*: 2 μm
- *numero di colpi di condizionamento iniziale*: 10 colpi.

L'apparecchiatura NAT è situata all'interno di una camera climatica in modo da garantire la corretta temperatura di prova e collegata ad un computer con cui è possibile registrare i dati e regolare i parametri.

È equipaggiato da una cella di carico, con capacità massima di sollecitazione pari a 20 kN, messa in contatto con un pistone che provvede all'applicazione del carico sulla barra posta sopra il provino.



Figura 42 - Provino posto all'interno dell'apparecchiatura NAT

Il provino è posto all'interno di un "castelletto" dove si possono notare, come da Figura 44 le relative componenti: le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori facendoli lavorare con una certa pressione iniziale (1), i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, il telaio al cui interno va posto il provino da testare (3), i morsetti di fissaggio che collegano il provino al telaio (4), il canale che permette il centramento del provino (5), le barre che permettono di posizionare i trasduttori a metà del provino (6), le viti che tengono in posizioni tali barre (7) ed infine la leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori (8).

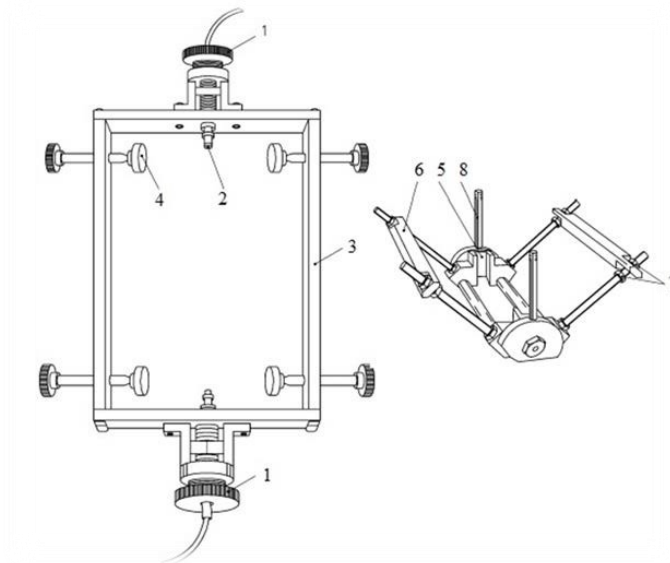


Figura 43 – Componentistica del "castelletto" nel quale si alloggia il provino

Un'azione preliminare da effettuare prima dell'esecuzione del test consiste nel misurare le altezze dei provini mediante un calibro, dotato di una precisione non inferiore a 0,1 mm. Il valore dell'altezza è ottenuto come la media di quattro misure, prese agli estremi di due diametri perpendicolari tra loro. Si illustrano ora le fasi previste durante l'esecuzione della prova di misurazione del modulo a trazione indiretta.

Preventivamente si impostano mediante un software (Calcheck Asphalt) i parametri della prova, determinati in base alle caratteristiche dei trasduttori.

Una volta settati i parametri iniziali, si avvia il software di prova (ITSM EN), per cui una volta creati i file, si procede nell'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software mediante i seguenti parametri:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
- Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,35;
- Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata;
- Target horizontal Deformation [μm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;
- Number of Conditioning Pulses: numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 2 μm .

Test temperature (°C) =	20.0
Specimen diameter (mm) =	100.0
Specimen thickness (mm) =	58.7
Poisson's ratio =	0.35
Target rise-time (ms) =	124
Target horizontal deformation (microns) =	3
Number of conditioning pulses =	10

Cooper Research Technology Limited

Exit Continue

Figura 44 - Schermata iniziale del software ITSM con dati input

Nel frattempo, si provvede anche all'allestimento del castelletto, inserendo il provino come precedentemente spiegato e ponendo il tutto all'interno della camera di prova. Per inserire il "castelletto" nella posizione corretta basterà appoggiarlo a ridosso di una "guida" estrusa sull'appoggio inferiore della camera e poi fare scorrere il tutto fino a che il castelletto non si blocchi. La "guida" ci permetterà quindi di centrare il provino in modo che il pistone combaci con la semisfera posta al di sopra del "castelletto" e di porlo con il giusto orientamento.

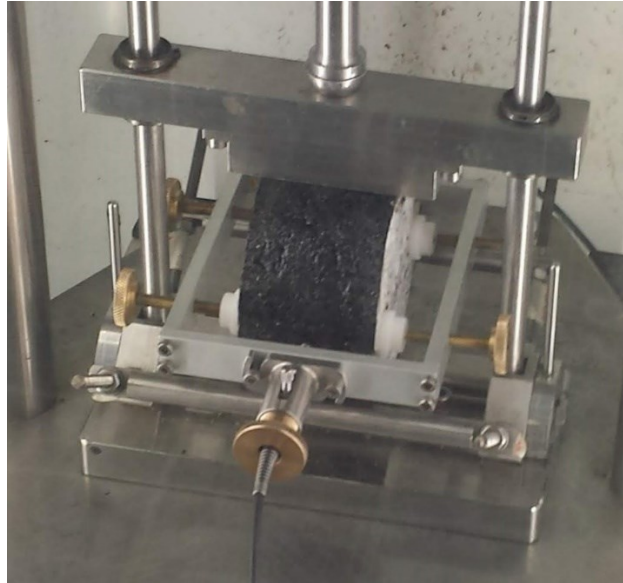


Figura 45 – “Castelletto” in posizione corretta all’interno della camera

Fatta questa operazione di inserimento, si passa alla schermata successiva del software, utile al controllo del pistone pneumatico; attraverso il comando “make contact” si può far aderire il pistone alla barra soprastante il provino, che scenderà fino ad applicare una forza di precarico pari a circa 30 N.

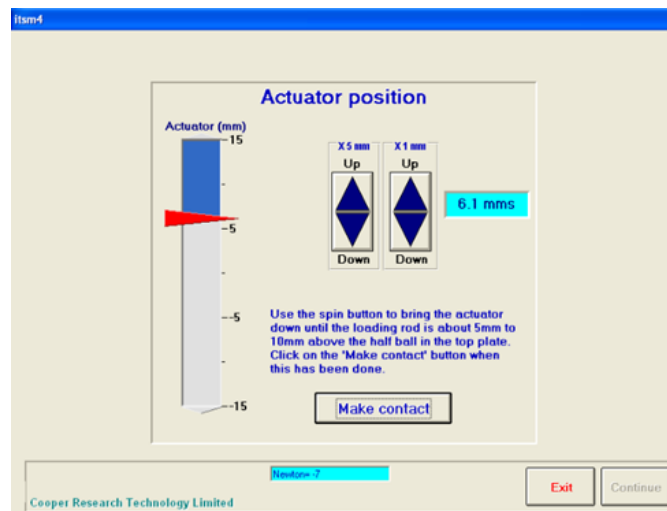


Figura 46 - Schermata con il comando "Make contact"

Lo step successivo si apre con una schermata destinata alla regolazione della pressione dei trasduttori sul provino.

La regolazione avviene in due step: nel primo i trasduttori si dispongono totalmente a pressione contro il provino, in modo che dalla schermata del software le “freccette” risultino a contatto con esso; nel secondo step invece, si procede a ruotare le due viti, allentandole finché le freccette non diventano

rosse. Se i trasduttori risultassero non sistemati correttamente, il dispositivo misurerebbe una deformazione errata del provino, che indurrebbe ad una errata applicazione del carico e quindi il risultato del test risulterebbe falsato.

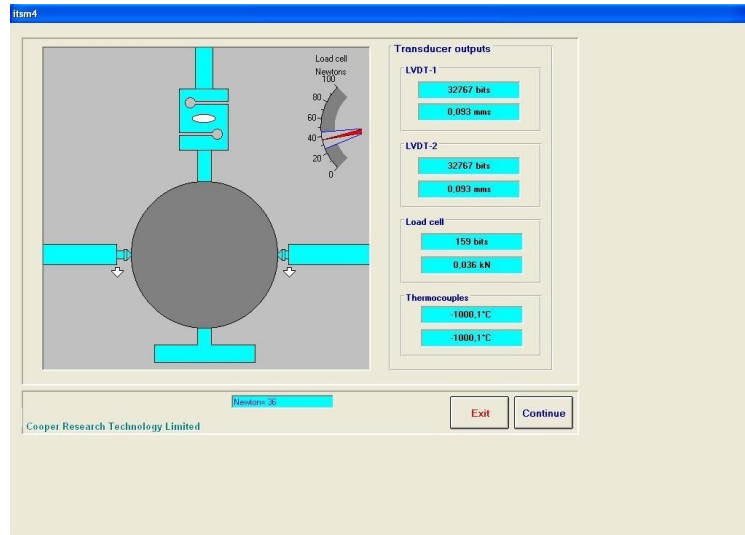


Figura 47 - Schermata prima della regolazione dei trasduttori

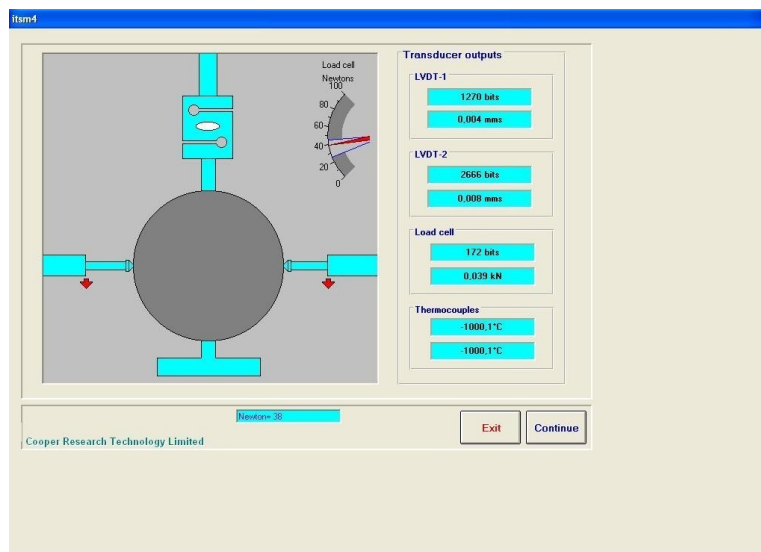


Figura 48 - Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

Si passa successivamente alla schermata nella quale si procede ad una fase di regolazione, in cui l'apparecchiatura applica dieci impulsi di precarico al provino in modo da calibrarlo correttamente. Questa schermata inoltre registra le misure ottenute e fornisce la possibilità di visualizzare i dati preliminari raccolti. Prima di avviare questa procedura di prova ci si deve assicurare che le leve, localizzate nel "castelletto" risultino abbassate e poi si avvia l'operazione premendo sul tasto "start"

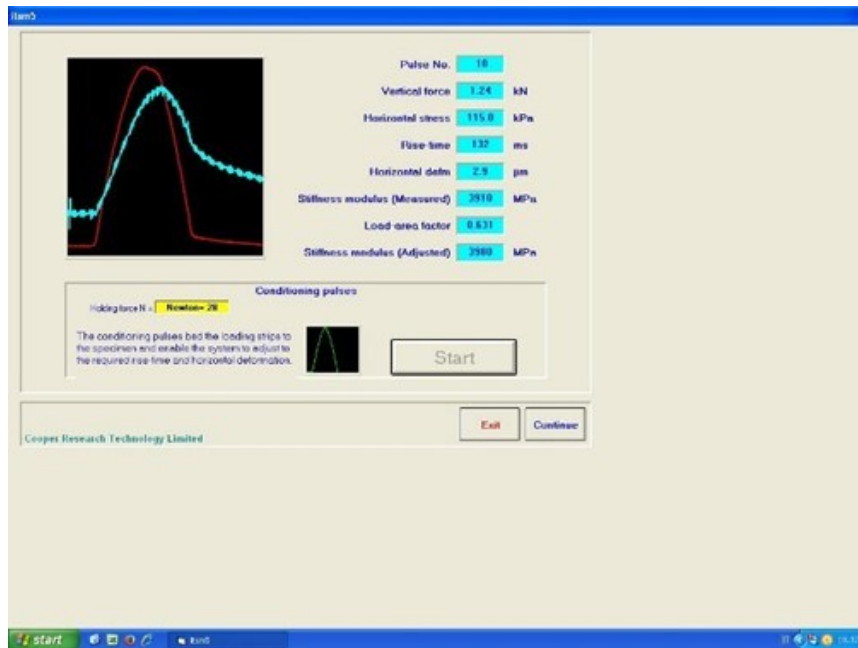


Figura 49 - Schermata degli impulsi di precarico

Terminata l'operazione di prova, verrà visualizzata nuovamente la schermata precedente di regolazione dei trasduttori, con lo scopo di verificare che il test non abbia compromesso il posizionamento di quest'ultimi; controllato ciò, si procede alla prossima schermata del software dove si avvia la misurazione vera e propria prevista dalla prova, da cui si ricavano i dati sperimentali.

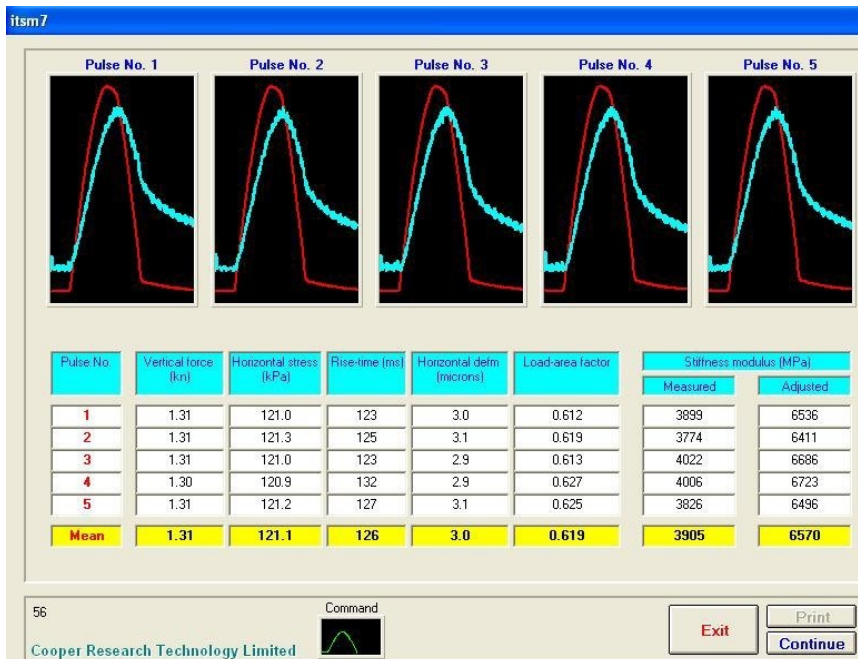


Figura 50 – Schermata con visualizzazione risultati

Effettuata la misurazione, nella schermata risulterà possibile visualizzare i grafici dei cinque impulsi (esprimono un confronto tra l'andamento teorico ed effettivo di ognuno di essi) e le loro relativi parametri di prova che dovranno essere controllati per ottenere dei dati finali che risultino accettabili. In particolare, per far sì che i risultati possano essere assunti come attendibili, bisogna controllare che il "rise time" di ogni impulso sia compreso in un range di ± 5 ms rispetto al valore prestabilito (124ms). Nella parte inferiore del display a destra, verranno restituite le misurazioni del modulo elastico espresso in due differenti forme: una risulterà quella misurata direttamente mentre l'altra corrisponderà al valore "aggiustato" attraverso il fattore di correzione. Entrambe risulteranno mediate su cinque misurazioni.

Completata l'intera procedura il software richiede che il provino venga ruotato di un angolo pari a 90° e quindi si ripete la procedura sopra elencata. La norma prevede che i valori dei moduli calcolati sui due diametri possano differire fino ad un massimo del 20%. Le due misure raccolte, se giudicate idonee, verranno poi mediate tra loro per ottenere il valore finale del modulo ITSM.

Prova di resistenza a trazione indiretta (UNI EN 12697-23)

La prova di trazione indiretta, anche detta prova "Brasiliana", consiste nell'applicazione di un carico diametrale verticale di compressione, tramite due teste di carico, lungo l'asse del provino fino alla sua rottura. Si viene a creare uno stato tensionale indiretto di trazione a causa della deformazione laterale del provino (effetto Poisson) e la rottura avviene per trazione.

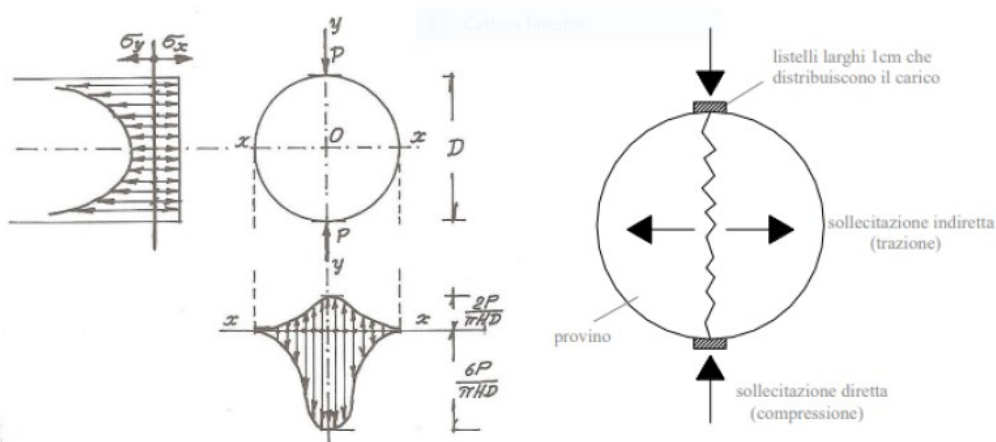


Figura 51 - Stato tensionale di un provino sottoposto alla prova di trazione indiretta

La prova di resistenza a trazione indiretta viene svolta a 25°C, nonostante potrebbe essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. Per tale motivo, prima dello svolgimento della prova, i provini vengono collocati per 24 ore in una camera climatica settata a 25°C.

L'apparecchiatura di prova impiegata è costituita da un sistema di carico che comprende due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base in cui sono presenti due guide verticali lungo le quali scorre, mediante due manicotti, la testa di carico superiore.

Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, con queste dimensioni:

- larghezza: 15 ± 2 mm;
- spessore: 4 ± 1 mm;
- lunghezza \geq della lunghezza della linea di contatto del provino.

Il provino si inserisce tra i piatti della pressa in modo da essere centrato, così che l'asse della porzione di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore, mantenendo entrambi nel piano verticale passante per l'asse del provino.



Figura 52 - Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

La prova, regolata dalla normativa UNI EN 12697-23, impone che la prova venga svolta a deformazione fissata. Pertanto, la testa di carico inferiore viene spinta con una velocità costante di circa 50 ± 2 mm/min.

Le misurazioni delle deformazioni, verticali e orizzontali, subite durante l'applicazione del carico dal provino e l'entità stessa del carico vengono effettuate mediante due comparatori.

Il controllo del dispositivo può avvenire mediante un pannello di comando posto direttamente sull'apparecchio oppure, come nel caso di sperimentazione, in remoto mediante l'ausilio del software

UTMII presente sul computer della postazione di prova. Attraverso il software si avvia la prova impostando dei parametri, come ad esempio le caratteristiche geometriche del provino, la velocità di avanzamento e il carico di fine prova. Una volta impostate queste caratteristiche si arriva al pannello di esecuzione della prova.

Durante l'esecuzione della prova, viene graficato attraverso il software la curva carico-deformazione in tempo reale.

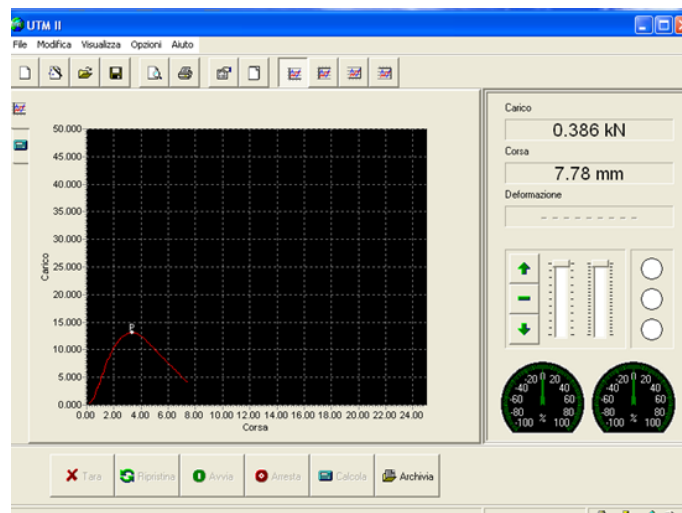


Figura 53 - Curva sforzo-deformazione risultante dall'applicazione del carico assiale

Terminata l'esecuzione della stessa, si procede ad avviare il calcolo e l'archiviazione dei dati, ottenendo in output i punti che formano la curva, i valori del carico di rottura a compressione, la deformazione a compressione, la resistenza a trazione indiretta ITS e il coefficiente di trazione indiretta ITC.

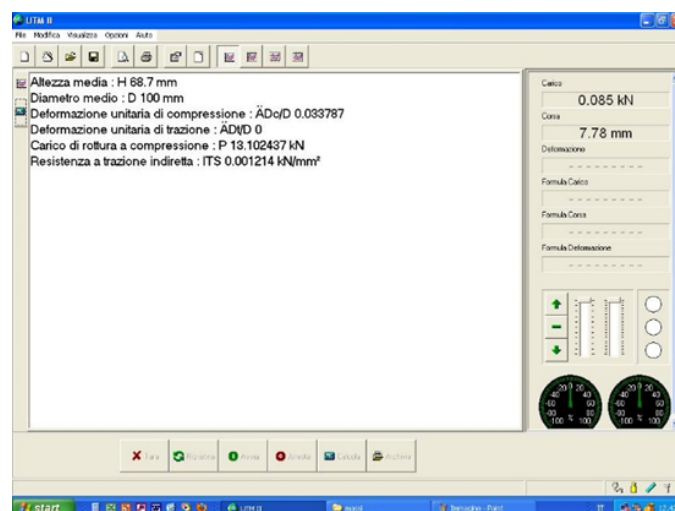


Figura 54 - Schermata con rielaborazione dei risultati

La Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, viene calcolata in base al carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

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

dove:

- P_{\max} è il carico massimo [N];
- t è l'altezza del provino [mm];
- D è il diametro del provino [mm].

Attraverso la determinazione del valore ITS, inoltre, si può procedere al calcolo del parametro CTI, coefficiente di trazione indiretta, che viene espresso mediante la seguente formula:

$$CTI = \frac{\pi}{2 \cdot ITS} \cdot \frac{d}{d_c}$$

dove:

- $\frac{d}{d_c}$ = deformazione unitaria a compressione

Dal capitolato speciale d'appalto ANAS si possono estrapolare i requisiti prestazionali riferiti al parametro ITS e a quello CTI, i quali risulteranno dover essere compresi in un range tra 0,72 e 1,45 nel primo caso mentre > 65 Mpa nel secondo.



Figura 55 - Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

CT-Index

Un ulteriore parametro determinato in seguito a questa prova è l'indice di tolleranza al cracking, conosciuto con l'abbreviazione di "CT index", che appare per la prima volta citato nella norma ASTM D8225-19, 2019. Per procedere al calcolo si fa riferimento al grafico carico-spostamento ottenuto dalla prova ITS, focalizzandosi in dettaglio nella fase post-picco e in particolare sulla pendenza della curva post-picco, nel punto dove si ha una riduzione del carico di picco del 25%. L'indice CT-index può essere calcolato con la seguente espressione:

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{G_f}{P} \cdot \frac{l}{D}$$

dove:

- t e D sono rispettivamente lo spessore e il diametro medio del campione;
- G_f è il lavoro di frattura o energia di frattura, cioè l'area sottesa alla curva forza-spostamento divisa per l'area della faccia di fessurazione, quindi $t \cdot D$;
- l e P/l sono lo spostamento e la pendenza della forza-spostamento quando il carico è ridotto del 25% rispetto a quello di picco.

$$\frac{P}{l} = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right|$$

La figura seguente illustra come la pendenza è determinata dalla curva carico-spostamento: Generalmente più un materiale risulta fragile e più il CT-index assume bassi valori.

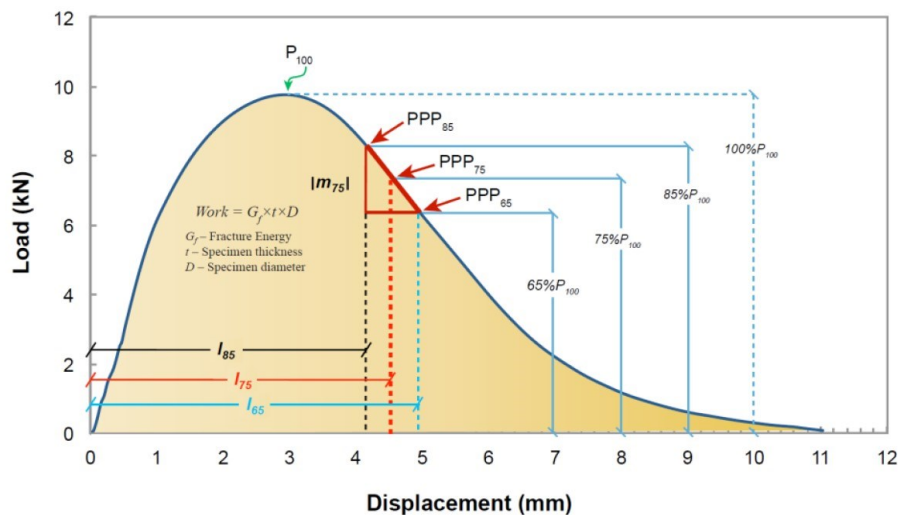


Figura 56 - Grafico di spiegazione della determinazione della pendenza

Prova di flessione semi-circolare (SCB)

La prova determina la resistenza a trazione o la tenacità alla rottura valutando il potenziale di propagazione della fessura, basandosi sulle indicazioni contenute nella norma europea UNI EN 12697-44.

La procedura di preparazione dei provini è la seguente:

- Si sezionano con un macchinario, tramite il loro taglio, provini con diametro da 150 mm, riducendo lo spessore a 50 ± 3 mm e assicurandosi che le facce siano piatte e parallele. Si taglia poi ogni nucleo in due campioni semicircolari uguali attraverso il centro;
- Si incide al centro del campione una tacca N con una larghezza di $(0,35 \pm 0,10)$ mm e una profondità di $(10,0 \pm 1,0)$ mm;

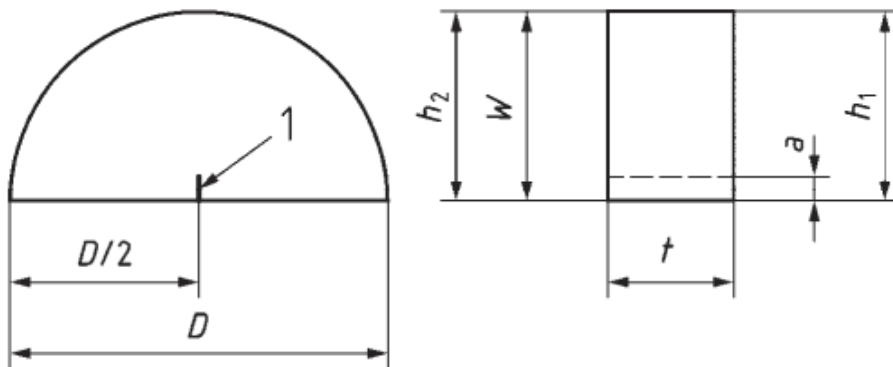


Figura 57 – Dimensioni specifiche del provino per prova SCB

- Si Incollano le strisce di supporto in metallo ai provini nella parte dove poggiano sui rulli;
- Assicurarsi che il campione sia asciutto. La massa costante si ottiene quando la variazione di massa tra due determinazioni a un intervallo di almeno 30 min è inferiore allo 0,1 % (m/m);
- Si misura il diametro del campione con i calibri in due punti lungo il lato più lungo del pezzo, registrando il diametro medio, D , con una precisione di 0,1 mm;
- Si misura l'altezza del provino con i calibri su ciascun lato, h_1 e h_2 . Bisogna scartare qualsiasi esemplare per cui $(h_1 - h_2) > 0,5$ mm, registrando l'altezza media, W , con una precisione di 0,1 mm;

- si misura lo spessore del provino con i calibri alle due estremità della base (t_1 e t_2) e in alto, sotto la striscia di carico (t_3). Bisogna scartare qualsiasi campione per il quale la differenza di spessore tra i tre valori di spessore è maggiore di 0,5 mm. Si Registra lo spessore medio, t , con una precisione di 0,1 mm;
- Si misura la profondità della tacca, a , con una precisione di 0,1 mm.



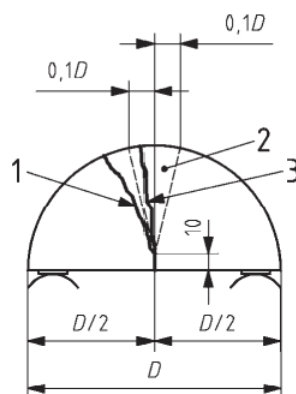
Figura 58 – Posizionamento provino prima dell'inizio prova a flessione semi-circolare

Per quanto concerne la procedura operativa:

- prima della prova i campioni devono essere posti alla temperatura di prova nella camera climatica (± 1) °C per almeno 4 h, con tempo che intercorre tra la rimozione del campione dalla camera climatica e la prova inferiore a 60 s;
- si posizionano la cella di carico nella parte superiore della macchina di prova e i cuscinetti a rulli sulla parte inferiore;
- si preleva il campione dalla camera climatica e lo si installa nella macchina di prova universale tra la striscia di carico e i cuscinetti a rulli nel minor tempo possibile, assicurandosi che il campione sia posizionato al centro del telaio di prova;
- la prova viene condotta attraverso l'applicazione di una deformazione costante di 5 mm/min, sul provino semicircolare con una fessura centrale, in modo tale che la base del provino sia sottoposta ad una sollecitazione di trazione e sia libera di scorrere sui rulli alla base;

- il carico corrispondente aumenta fino ad un valore massimo, F_{max} , cioè direttamente in relazione alla resistenza alla frattura del campione di prova.

Si esegue una prova valida se la cricca termina in una zona ± 15 mm (= 10 % del diametro del provino) dal centro della striscia di carico. Se la crepa termina al di fuori di quest'area bisogna scartare il risultato: la definizione di una zona valida è necessaria per eliminare la possibilità di avere grandi variazioni nei risultati dei test.



Key

- 1 Invalid test
- 2 Zone for valid test result
- 3 Valid Test

Figura 59 – Criteri per validazione test

La determinazione di un test valido può essere facilitata con un'apparecchiatura opzionale come mostrato in Figura.



Figura 60 – Strumento per facilitare la validazione del test visivamente

L'intaglio alla base del provino ha il compito di innescare tensioni all'apice dello stesso le quali porteranno a rottura il materiale. La prova misura quanto un provino di conglomerato bituminoso

possa resistere alla frattura quando vi è presente una preesistente fessura, come nel caso della sovrastruttura stradale sottoposta a deformazioni dovute al carico veicolare che portano allo sviluppo di fenomeni di fatica.

Le prove sperimentali sono state effettuate ad una temperatura di 10°C, rappresentativa della prova a bassa temperatura, la quale evidenzia la potenziale caratteristica del conglomerato bituminoso di riscontrare fessurazioni termiche.

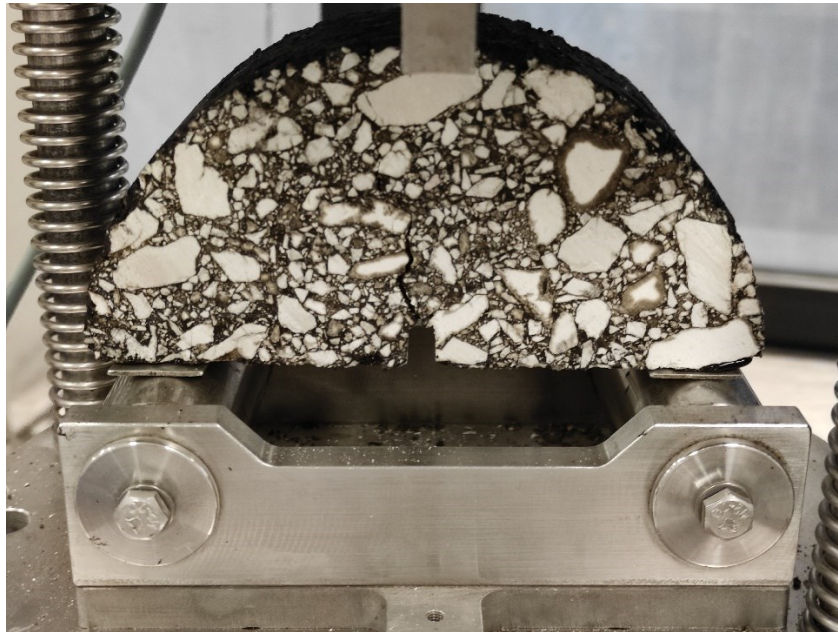


Figura 61 – Particolare provino a rottura a 10 °C avvenuta

I risultati del test, ovvero la curva forza-spostamento ottenuta, può essere utilizzata per calcolare:

- il carico massimo che il materiale contenente un intaglio (fessura) può sopportare prima del cedimento;
- quando la presenza di un notch è critica, calcolando la tenacità a frattura e l'energia di frattura

Si determina pertanto dalla curva forza-spostamento la deformazione verticale alla massima forza:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta W}{W} \times 100\%$$

Dove:

- ε_{\max} è deformazione verticale alla massima forza [-]
- ΔW è lo spostamento verticale alla massima forza [mm]
- W è l'altezza del provino [mm]

Si calcola la tensione a rottura come:

$$\sigma_{\max} = \frac{4,263 * F_{\max}}{D * t}$$

Dove:

- σ_{\max} è la tensione a rottura [N/mm²]
- D è il diametro del provino [mm]
- T è lo spessore del provino [mm]
- Fmax è la forza massima [N]

Per calcolare la tenacità a frattura si fa riferimento alla seguente formula:

$$K = \sigma_{\max} * f \left(\frac{a}{W} \right)$$

Dove:

- σ_{\max} tensione a rottura [N/mm²]
- W è l'altezza del provino [mm]
- A è la profondità del notch [mm]
- $f \left(\frac{a}{W} \right)$ è un fattore geometrico con le seguenti caratteristiche in figura da rispettare

For $9 < a_i < 11$ mm and $70 < W_i < 75$ mm, then:

$$f \left(\frac{a_i}{W_i} \right) = 5,956$$

NOTE 1 For other a_i or W_i values, the following equation can be used to calculate the geometric factor $f(a_i/W_i)$:

$$f \left(\frac{a_i}{W_i} \right) = -4,9965 + 155,58 \left(\frac{a_i}{W_i} \right) - 799,94 \left(\frac{a_i}{W_i} \right)^2 + 2141,9 \left(\frac{a_i}{W_i} \right)^3 - 2709,1 \left(\frac{a_i}{W_i} \right)^4 + 1398,6 \left(\frac{a_i}{W_i} \right)^5$$

Figura 62 – Caratteristiche del fattore geometrico

Infine, si calcola l'energia di frattura G come:

$$G = \frac{\text{Energia}}{t \cdot (W - a)}$$

Dove:

- l'energia al numeratore si calcola come l'area sottesa alla curva forza-spostamento [N*mm]
- $t \cdot (W - a)$ corrisponde all'area della sezione di rottura [mm²]

Estrazione del bitume

Per l'estrazione del bitume dal conglomerato bituminoso si è utilizzato un sistema automatico di estrazione che consente la disgregazione e separazione del campione di conglomerato tramite irrorazione di solvente (tricloroetilene) e setacciatura, separazione per centrifugazione del filler ed il recupero del solvente utilizzato.

L'intero ciclo avviene in maniera automatizzata.



Figura 63 – Macchinario per l'estrazione del bitume

CAPITOLO 3

RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguente capitolo si illustra la seconda parte, prevalentemente analitica, del lavoro sperimentale trattato in questa tesi. Si analizzano i risultati sperimentali ottenuti dalle singole prove eseguite sui provini delle miscele di conglomerato bituminoso di progetto confezionato a caldo. I risultati sono ottenuti mediando due provini per ogni miscela sperimentata, per quanto concerne la caratterizzazione volumetrica mediante procedimento C, mentre per la caratterizzazione meccanica, mediando quattro provini per ogni miscela.

Tali risultati saranno esplicitati nei paragrafi successivi tramite appositi grafici che analizzeranno l'influenza sui valori finali di ogni miscela, in termini di contenuto di vuoti residui, modulo di rigidità a trazione indiretta, resistenza a trazione indiretta e fragilità rappresentata dal CT-Index, dei seguenti fattori:

- Influenza della tipologia di plastica adottata, a parità di dosaggio, su miscele con contenuto di bitume del 4,9%
- Influenza del dosaggio di plastica, a parità di tipologia adottata, su miscele con contenuto di bitume del 4,9%
- Influenza della riduzione del contenuto di bitume, a parità di tipologia, relativa a miscele con dosaggi del 2% di plastiche.

Tali risultati vengono sempre confrontati con i valori della miscela di riferimento.

Inoltre, si analizza l'influenza della temperatura di condizionamento dei provini sulla rottura e sulla fragilità, a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con dosaggi di plastiche del 2% e di bitume del 4,2%.

Vengono riportate delle osservazioni dopo il primo impasto, utili alla comprensione della scelta sul valore della temperatura di miscelazione dell'iter sperimentale, oltre che osservazioni dopo aver effettuato l'estrazione del bitume, che aiutano a comprendere l'interazione tra bitume e plastica.

Infine, si analizza la tenacità a frattura e l'energia a frattura, entrambe a bassa temperatura, a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con dosaggi di plastiche del 2% e di bitume del 4,2%, per simulare la fessurazione termica e la resistenza all'apertura di fessure.

Osservazioni dopo il primo impasto

La scelta della temperatura di miscelazione è stata oggetto delle seguenti osservazioni che ne hanno fissato il valore.

Il primo impasto della sperimentazione è stato eseguito alla temperatura di 170 °C impiegando l'1% di plastiche in foglia (frazione galleggiante).

Al termine della prima fase di miscelazione (aggregati caldi + plastica fredda), si è notato che alcuni frammenti di plastica non si erano sciolti ma si erano “accartocciati” (Fig. 64 e 65)



Fig. 64 – Cartocci di plastiche presenti dopo la miscelazione con gli aggregati a 170°C



Fig. 65 – Cartocci di plastiche rimasti attaccati alla pala del miscelatore

Al fine di accertare la possibilità di risolvere il problema aumentando la temperatura di miscelazione è stato eseguito un impasto con aggregati riscaldati a 190 °C.

Come si può evincere dalla Fig. 66, anche in questo caso le plastiche in foglia non si sono completamente sciolte.



Fig. 66– Cartocci di plastiche presenti dopo la miscelazione con gli aggregati a 190°C

Prove di impasto a temperature più elevate non sono state eseguite perché avrebbero danneggiato il bitume causato da un eccessivo indurimento.

Pertanto, non avendo riscontrato un significativo miglioramento alla temperatura di 190 ° C, esclusa la possibilità di eseguire miscelazioni a temperature superiori, si è deciso di fissare la temperatura di miscelazione a 170°C per tutti gli impasti.

Nella successiva Fig. 67 si può vedere che, anche utilizzando le plastiche B e C, nella miscelazione con gli aggregati riscaldati a 170 °C non si realizza il completo scioglimento.



Fig. 67 – Grumi di plastiche estruse a sinistra e densificate a destra, presenti dopo la miscelazione con gli aggregati a 170°C

Influenza della tipologia di plastica

Si riportano i risultati delle caratteristiche volumetriche, determinati con il procedimento C (procedimento con provino sigillato), ottenute valutando l'influenza della tipologia di plastica a parità di dosaggi, relativi alle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del volume dei vuoti $V_{m,sea}$ espressi in percentuale, determinati effettuando una media su due provini per ogni tipologia di miscela.

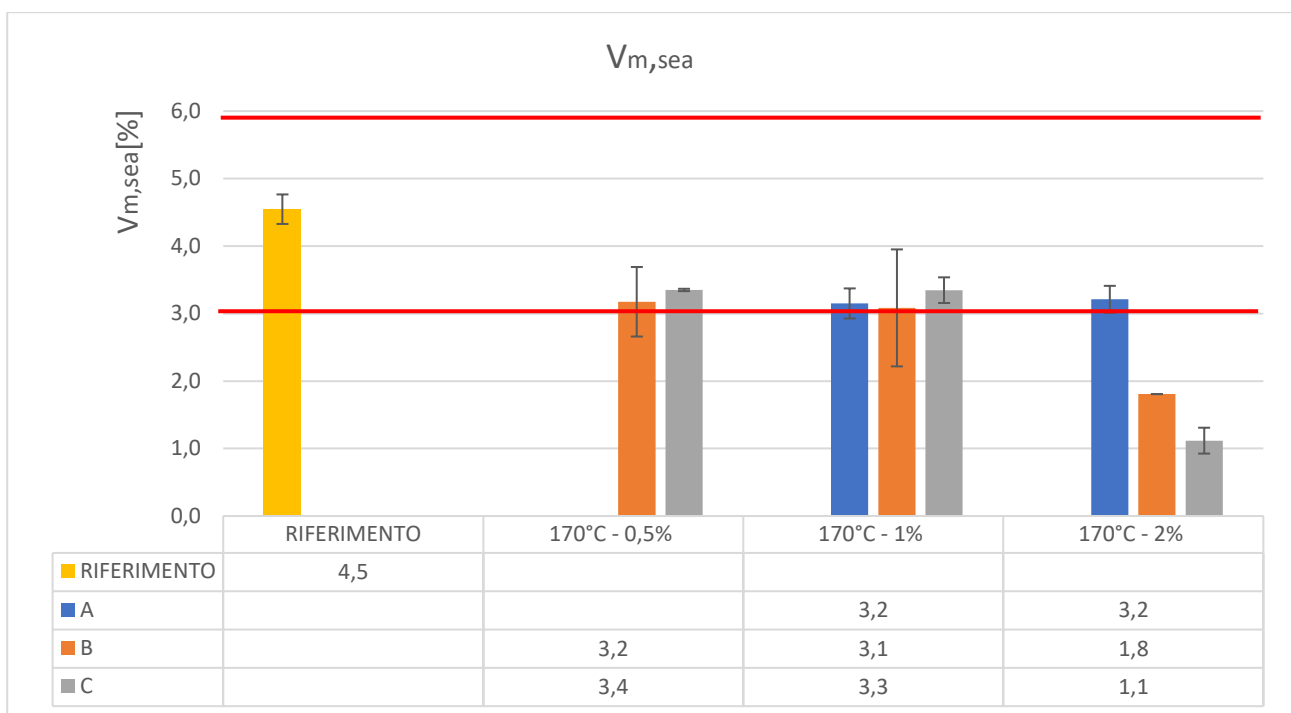


Fig. 68 – Contenuto dei vuoti al variare della tipologia di plastiche

In tutte le miscele sperimentate il contenuto dei vuoti è minore rispetto alla miscela di riferimento.

Non si notano grosse differenze fra le tre tipologie di plastiche a parità di contenuto, tra lo 0,5% e l'1%.

Analizzando invece il comportamento con dosaggi al 2%, si vede una netta demarcazione tra le tipologie, con contenuti di vuoti che decrescono rispettivamente passando dalla tipologia A, B e C.

In linea con le restrizioni applicate dai capitolati Anas che prescrivono un contenuto di vuoti residui richiesti nelle miscele per strati di binder, compresi tra il 3% e il 6%, le miscele 2% B e 2% C non rientrano all'interno delle suddette prescrizioni.

Si riportano i risultati relativi al modulo elastico a trazione indiretta, determinati con il NAT, ottenute valutando l'influenza della tipologia di plastica a parità di dosaggi analizzati, sulle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del modulo elastico ITSM espressi in MPa, determinati effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

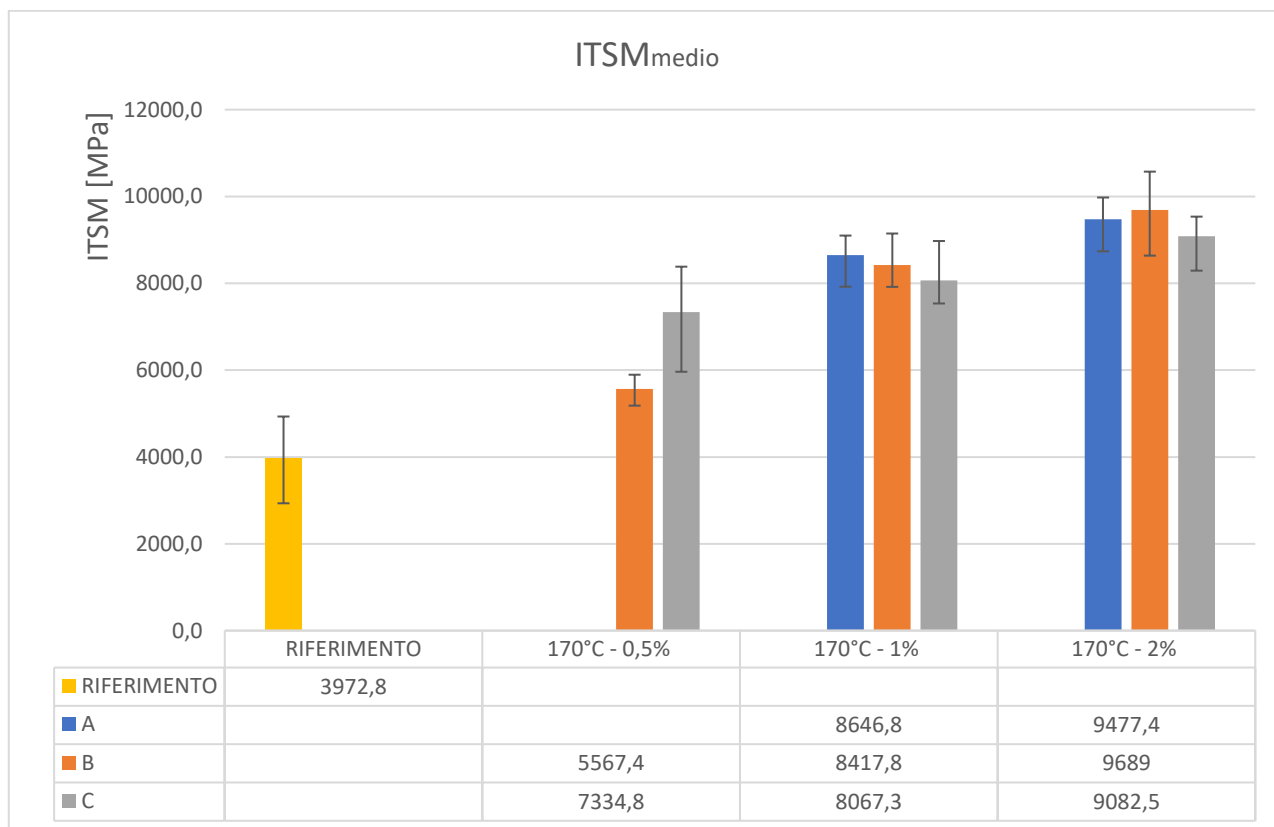


Figura 69 - Modulo di rigidezza al variare della tipologia di plastiche

In tutti i casi analizzati le miscele sperimentate hanno un valore ITSM maggiore rispetto a quello di riferimento.

A parità dei dosaggi analizzati, per miscele con contenuti del 1% e 2% di plastiche, non si riscontrano variazioni significative tra le tipologie con valori del modulo raddoppiati rispetto al riferimento.

Per le miscele con contenuti di plastiche allo 0,5%, i valori sono maggiori in maniera più modesta e presentano variazioni tra la tipologia B e C.

Si riportano i risultati relativi al valore di resistenza a trazione indiretta, determinati con prova Brasiliana, ottenute valutando l'influenza della tipologia di plastica a parità di dosaggi analizzati, sulle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori ITS espressi in MPa, determinati effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

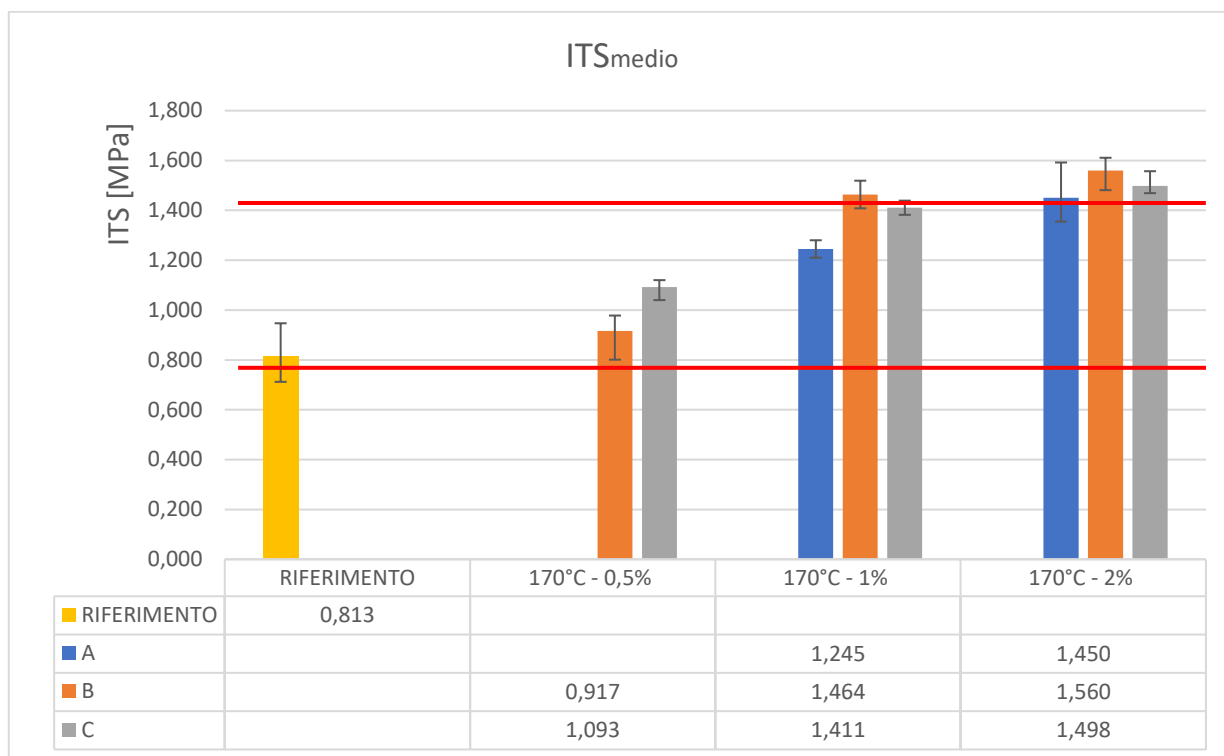


Figura 70 – Resistenza a trazione indiretta al variare della tipologia di plastiche

In tutti i casi le miscele sperimentate rilevano un valore ITS maggiore rispetto alla miscela di riferimento.

Non si riscontrano variazioni significative tra le tipologie a parità di dosaggi.

In linea con le restrizioni applicate dai capitolati Anas sul valore ITS richiesti nelle miscele per strati di binder, comprese tra 0,72 e 1,45, le miscele 1% B, 2% B e 2% C non rientrano all'interno delle suddette prescrizioni.

Si riportano i risultati relativi al valore CT-Index, determinati elaborando i risultati ottenuti dal grafico forza-spostamento delle prove di rottura, ottenuti valutando l'influenza della tipologia di plastica a parità di dosaggi analizzati, sulle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del CT-Index, determinato effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

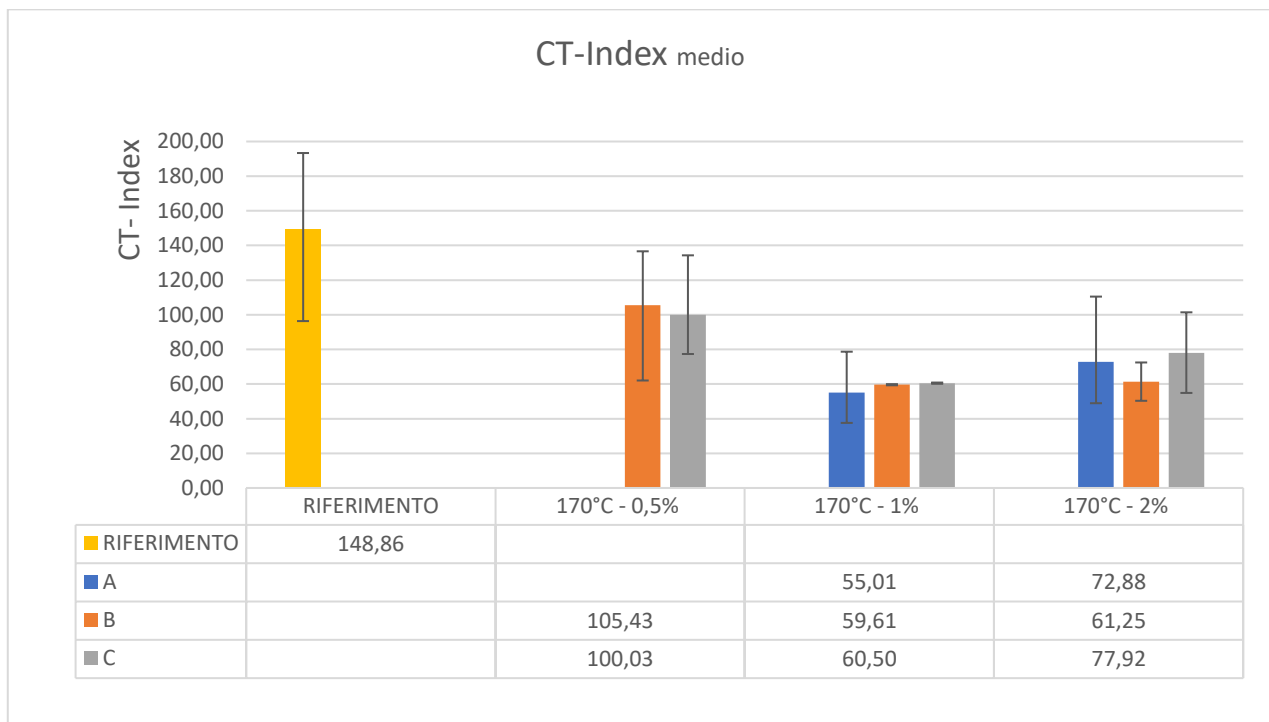


Figura 71 – CT-Index al variare della tipologia di plastiche

La miscela di riferimento presenta valori di fragilità più bassi rispetto a tutte le miscele sperimentate. Le miscele a parità di dosaggio, in tutti i casi, non risultano influenzate dalla tipologia di plastica adottata.

Influenza del dosaggio di plastica

Si riportano i risultati inerenti alle caratteristiche volumetriche, determinati con il procedimento C (procedimento con provino sigillato), ottenute valutando l'influenza del dosaggio di plastica a parità di tipologie analizzate, relative a miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del volume dei vuoti $V_{m,sea}$ espressi in percentuale, determinati effettuando una media su due provini per ogni tipologia di miscela.

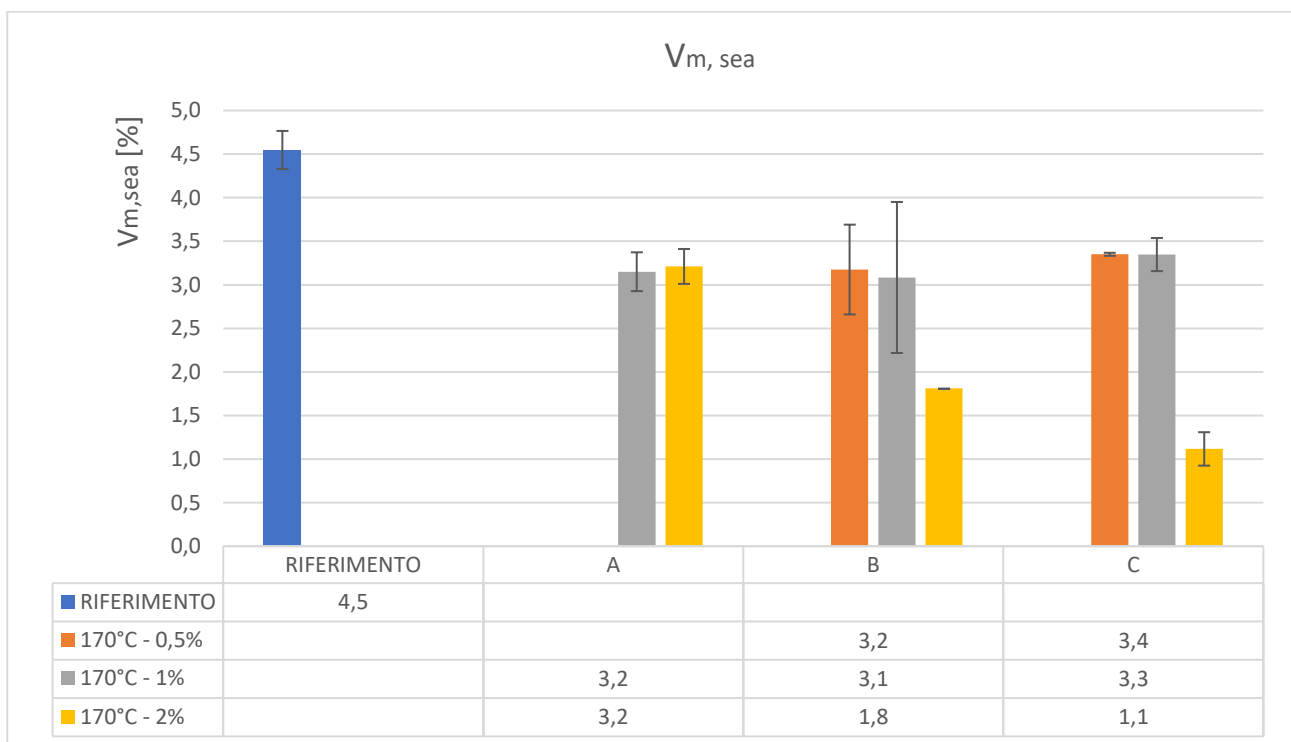


Fig. 72 – Contenuto dei vuoti al variare del dosaggio di plastiche

In tutte le tipologie si riscontra un contenuto di vuoti residui minore rispetto alla miscela di riferimento.

Nella tipologia B e C, il volume dei vuoti tende a calare in maniera significativa all'aumentare della quantità di plastiche inserita, passando dall'1% al 2%, mentre non si riscontrano grosse differenze passando dallo 0,5% all'1%.

Nella tipologia A non sembrerebbe esserci dipendenza tra dosaggio di plastiche e contenuto di vuoti residui, che rimangono pressoché invariati. Potrebbe essere dettato da un non completo scioglimento delle plastiche.

Si riportano i risultati relativi al modulo elastico a trazione indiretta, determinati con il NAT, ottenute valutando l'influenza del dosaggio di plastiche a parità di tipologia, sulle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del modulo elastico ITSM espressi in MPa, determinati effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

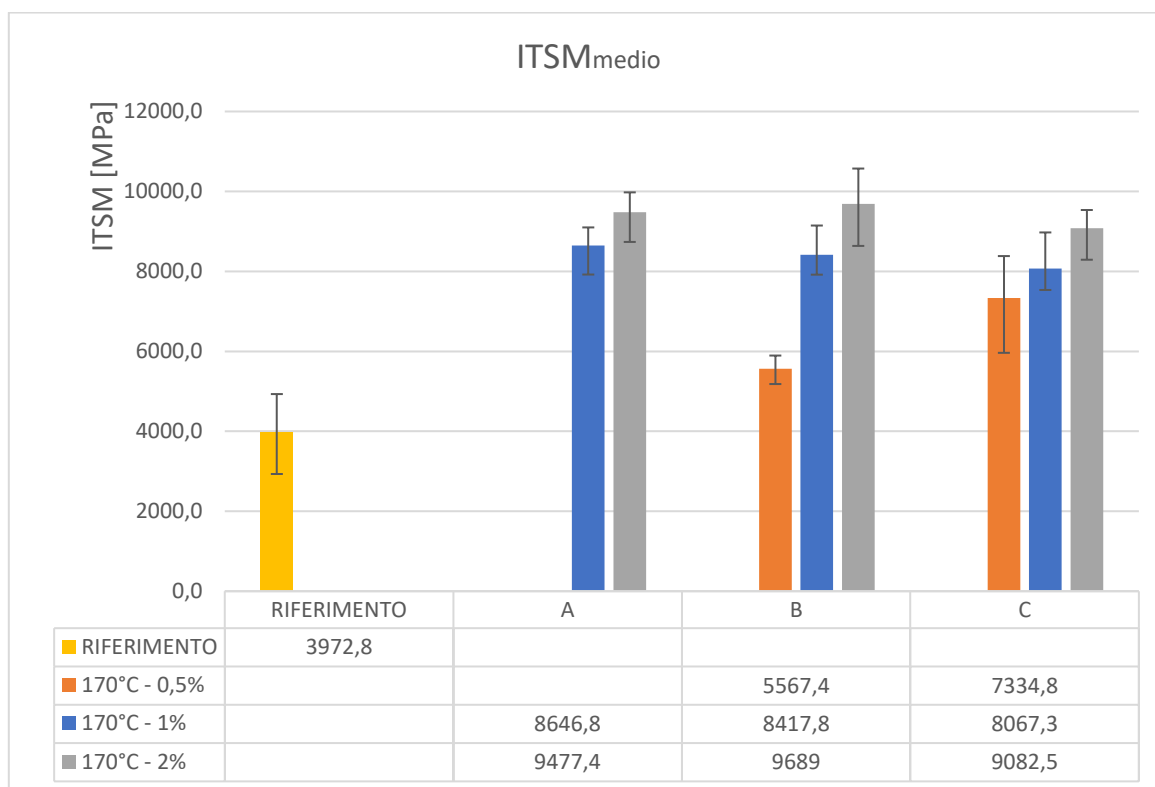


Fig. 73 – Modulo di rigidezza al variare del dosaggio di plastiche

In tutti i casi analizzati le miscele sperimentate hanno un valore ITSM maggiore rispetto a quello di riferimento.

A parità di tipologie, in tutti i casi, aumentando il contenuto di plastiche aumenta la rigidezza.

Poiché all'aumentare del quantitativo di plastiche diminuiscono i vuoti residui, gli incrementi dei valori del modulo potrebbero dipendere, almeno in parte, dal maggiore grado di addensamento.

Si riportano i risultati relativi al valore di resistenza a trazione indiretta, determinati con prova Brasiliana, ottenute valutando l'influenza del contenuto di plastica a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del valore ITS espresso in MPa, determinato effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

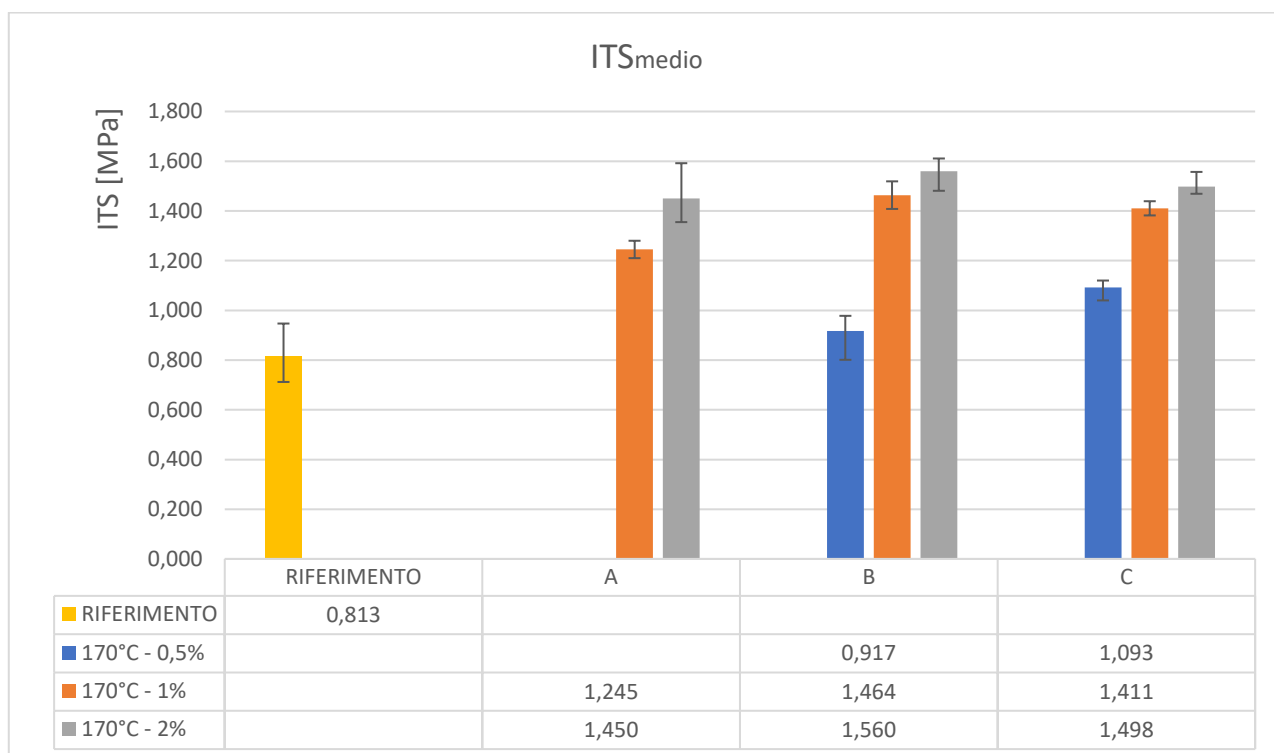


Fig. 74 – Resistenza a trazione indiretta al variare del dosaggio di plastiche

In tutti i casi le miscele sperimentate rilevano un valore ITS maggiore rispetto alla miscela di riferimento, con un andamento crescente proporzionale ai dosaggi di plastiche.

Si riportano i risultati relativi al valore CT-Index, determinati elaborando i risultati del grafico forza-spostamento delle prove di rottura, ottenuti valutando l'influenza dei dosaggi di plastica a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con contenuti di bitume del 4,9%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del valore CT-Index, determinato effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

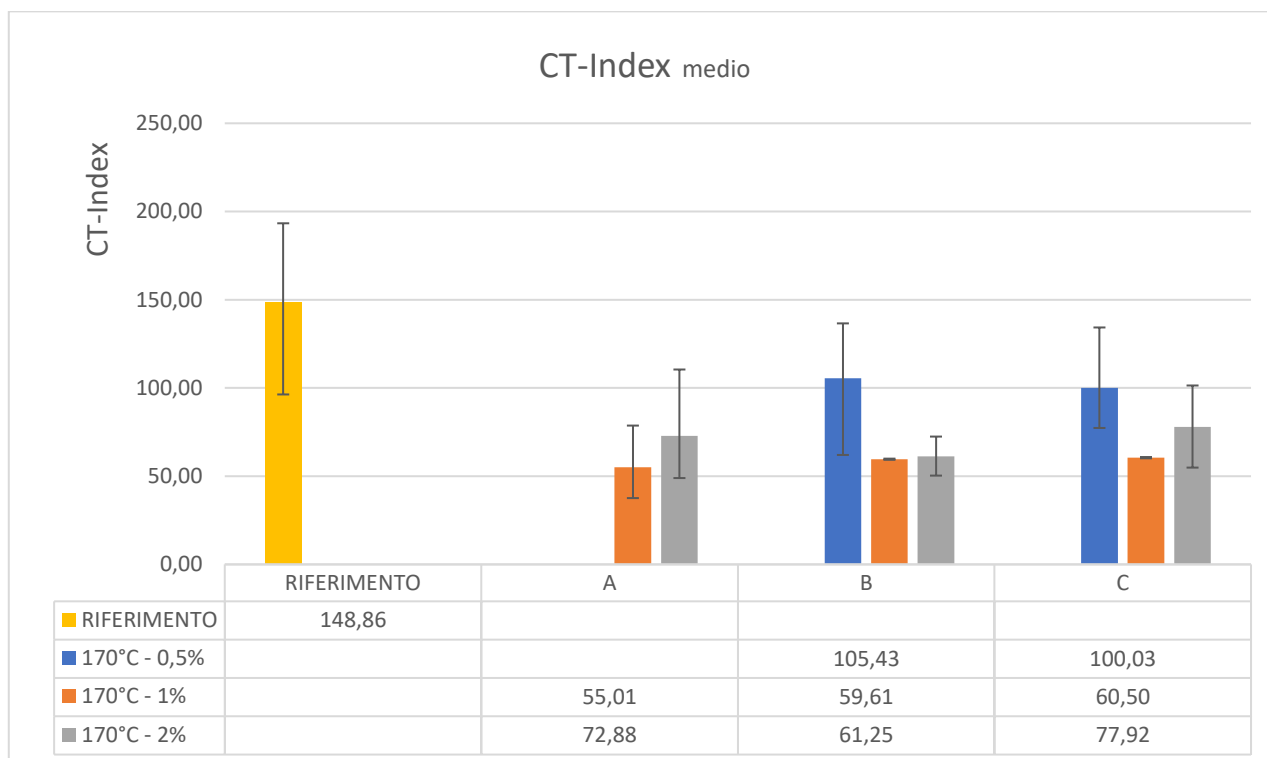


Fig. 75 – CT-Index al variare del dosaggio di plastiche

La miscela di riferimento presenta valori di fragilità più bassi rispetto a tutte le miscele sperimentate. Rispetto alla miscela di riferimento, con dosaggi di plastiche dell'1 % e 2% si ha un netto aumento della fragilità, con valori tra loro confrontabili e leggermente inferiori con il 2%.

Per miscele allo 0,5% si ha una riduzione del circa il 30 % rispetto al valore di riferimento.

Influenza del contenuto di bitume

Dalle precedenti analisi volumetriche è risultato che per miscele con dosaggi al 2%, con particolare riferimento alle tipologie B e C, il contenuto dei vuoti residui decade bruscamente rispetto alla miscela di riferimento.

Pertanto, per rimanere all'interno del range prescritto dai capitolati Anas, si è sperimentata l'influenza della riduzione del contenuto di bitume sulle caratteristiche della miscela, a parità di tipologie, relative a miscele con dosaggi del 2% di plastiche.

Si riportano i risultati delle caratteristiche volumetriche, determinati con il procedimento C (procedimento con provino sigillato), confrontando i risultati con la miscela di riferimento e riportando nella seguente figura i valori del volume dei vuoti $V_{m, sea}$ espressi in percentuale, determinati effettuando una media su due provini per ogni tipologia di miscela.

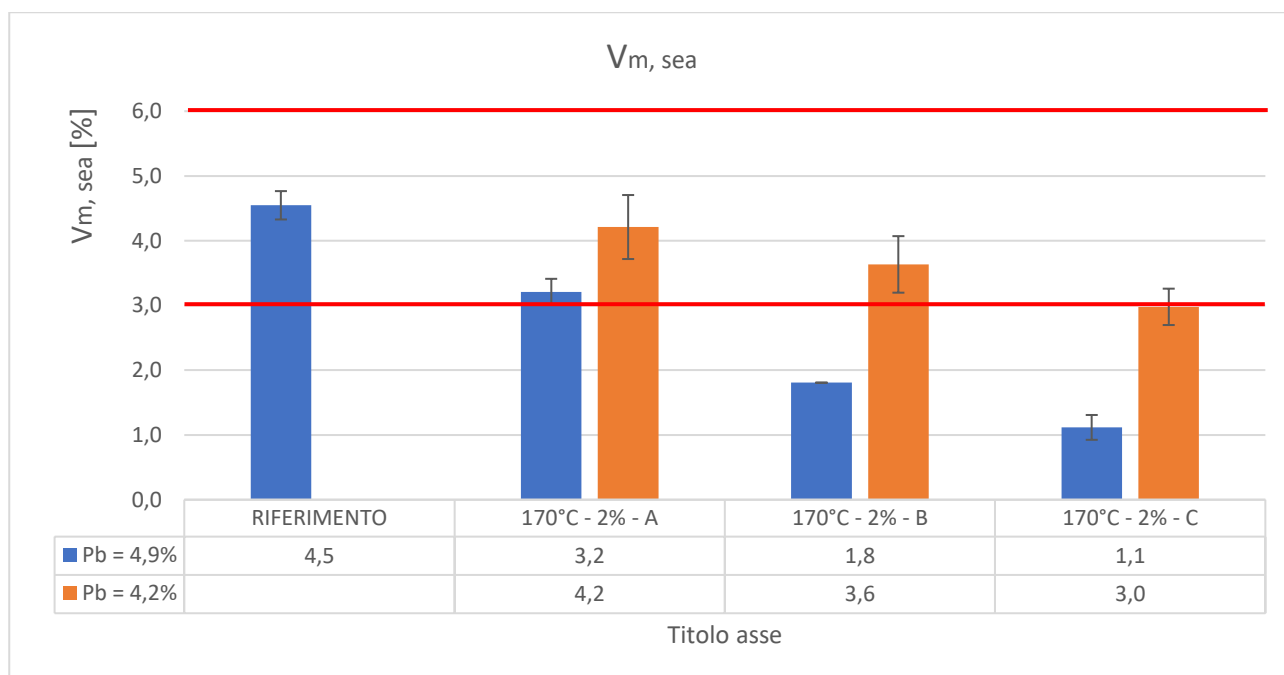


Fig. 76 – Contenuto dei vuoti al variare del dosaggio di bitume

Riducendo il contenuto di bitume dal 4,9% al 4,2 %, su tutte le tipologie il contenuto dei vuoti aumenta rientrando all'interno delle prescrizioni dettate da Anas, con incrementi maggiori nelle tipologie B e C rispetto alla A.

Persiste l'andamento delle miscele al 4,9% nella demarcazione tra le tipologie al 4,2%, con contenuti di vuoti che decrescono rispettivamente passando dalla tipologia A, B e C.

Si riportano i risultati relativi al modulo elastico a trazione indiretta, determinati con il NAT, ottenute valutando l'influenza del dosaggio di bitume a parità di tipologie, relative a miscele con dosaggi di plastiche al 2%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del modulo elastico ITSM espressi in MPa, determinati effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

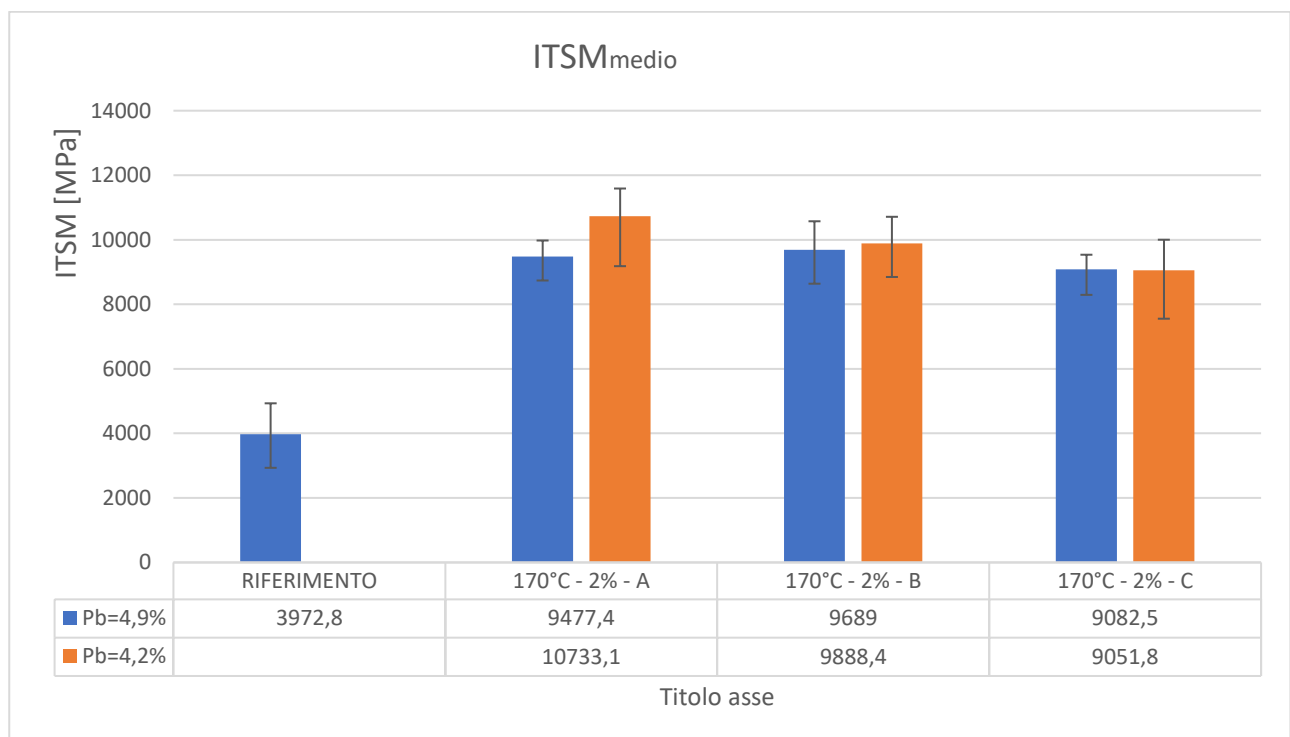


Fig. 77 – Modulo di rigidezza al variare del dosaggio di bitume

In tutti i casi analizzati le miscele sperimentate hanno un valore ITSM maggiore rispetto a quello di riferimento.

Nelle tipologie B e C, il contenuto di bitume sembrerebbe non influenzare in maniera significativa la rigidezza della miscela, con valori confrontabili.

Nella tipologia A la riduzione del contenuto di bitume comporta un leggero aumento della rigidezza.

Si riportano i risultati relativi al valore di resistenza a trazione indiretta, determinati con prova Brasiliana, ottenute valutando l'influenza del contenuto di bitume a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con dosaggi di plastiche del 2%.

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del valore ITS espresso in MPa, determinato effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

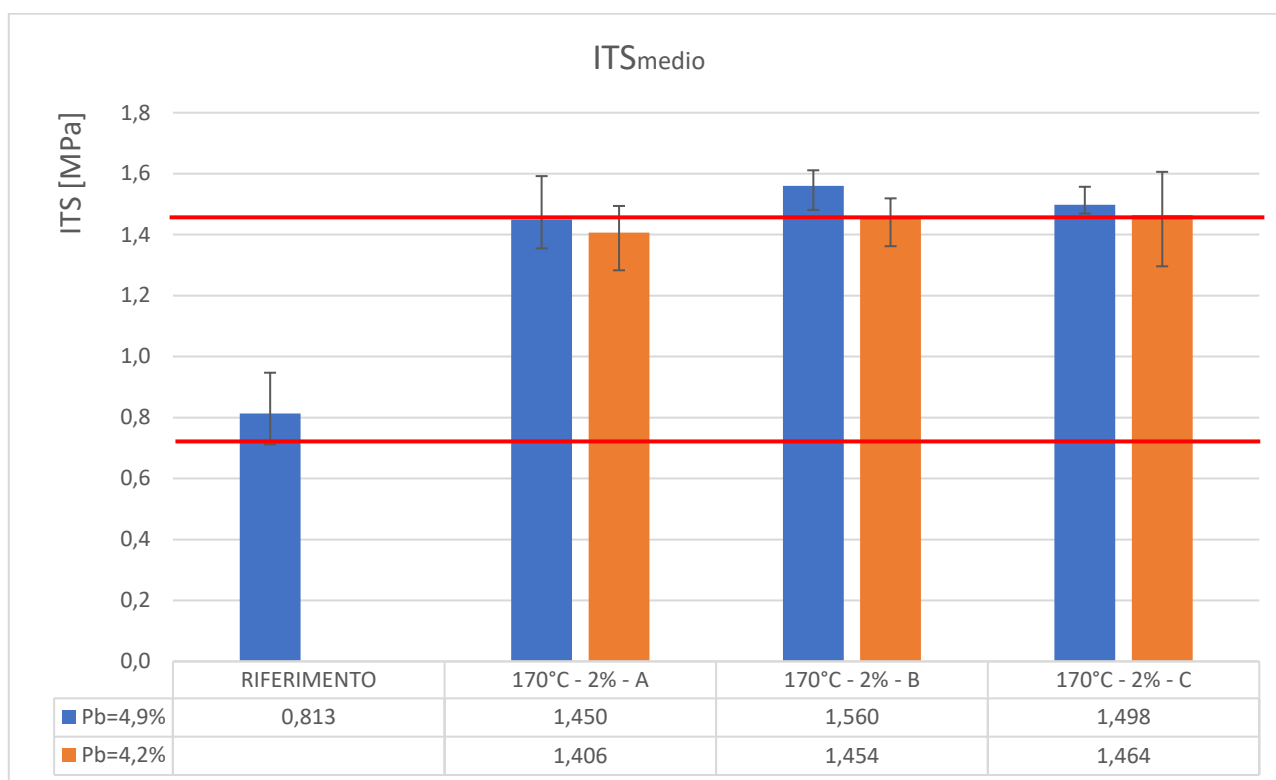


Fig. 78 – Resistenza a trazione indiretta al variare del dosaggio di bitume

In tutti i casi le miscele sperimentate rilevano un valore ITS maggiore rispetto alla miscela di riferimento.

Nelle tre tipologie di plastiche analizzate, la riduzione del contenuto di bitume comporta esigue diminuzioni del valore ITS, quasi trascurabili.

In linea con le restrizioni applicate dai capitolati Anas sul valore ITS richiesti nelle miscele per strati di binder, comprese tra 0,72 e 1,45, le miscele 2% B e 2% C riducono i valori, permettendo però solo alla miscela 2% B di rientrare nei limiti delle specifiche.

Si riportano i risultati relativi al valore CT-Index, determinati elaborando i risultati del grafico forza-spostamento delle prove di rottura, ottenuti valutando l'influenza del contenuto di bitume a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con dosaggi di plastiche del 2%

Si confrontano i risultati con la miscela di riferimento, riportando nella seguente figura i valori del valore CT-Index, determinato effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

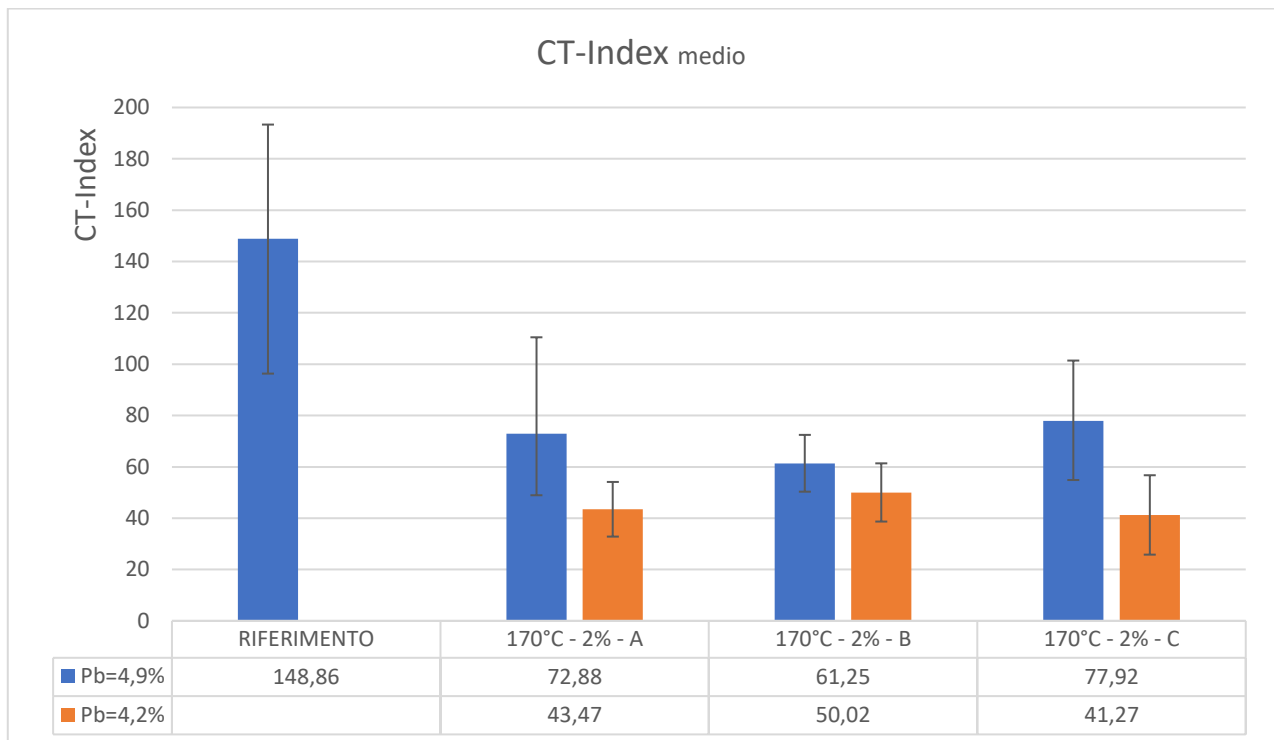


Fig. 79 – CT-Index al variare del dosaggio di bitume

La miscela di riferimento presenta valori di fragilità più bassi rispetto a tutte le miscele sperimentate. In tutte le tipologie la riduzione del contenuto di bitume comporta una maggiore fragilità.

Influenza della temperatura

Si riportano i risultati relativi al valore di resistenza a trazione indiretta, determinati con prova Brasiliana effettuata su provini condizionati alle temperature di 20°C e 10 °C, per valutare l'influenza della temperatura sulla rottura a parità di tipologie analizzate sulle miscele con dosaggi di plastiche del 2% e di bitume del 4,2%.

Si riportano nella seguente figura i valori ITS espresso in MPa, determinato effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

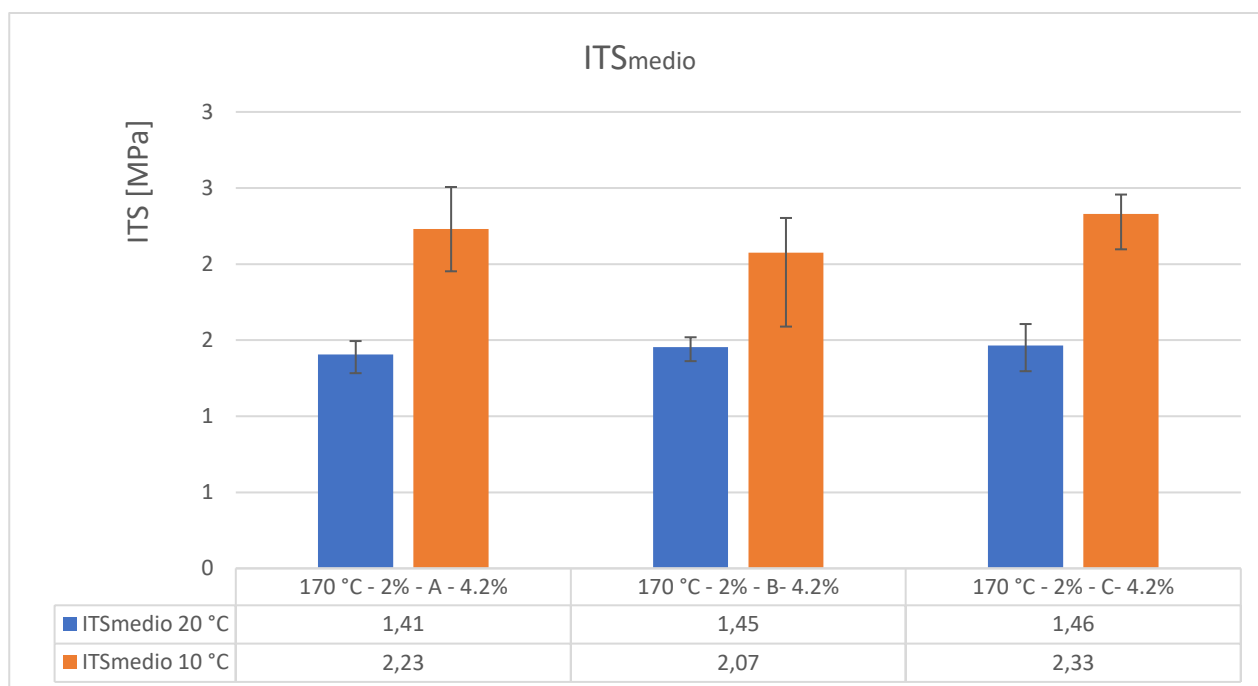


Fig. 80 – Resistenza a trazione indiretta al variare della temperatura

La temperatura dei provini incide sul comportamento a rottura in maniera uguale in tutte le tipologie, presentando valori ITS 10°C maggiori rispetto a quelli ottenuti a 20°C, ma comunque simili tra loro.

Si riportano i risultati relativi al valore CT-Index, determinati elaborando i risultati del grafico forza-spostamento delle prove di rottura, utili per valutare l'influenza della temperatura sulla fragilità a parità di tipologie analizzate, sulle miscele con dosaggi di plastiche del 2% e di bitume del 4,2%.

Si riportano nella seguente figura i valori i valori del CT-Index, determinati effettuando una media su quattro provini per ogni tipologia di miscela.

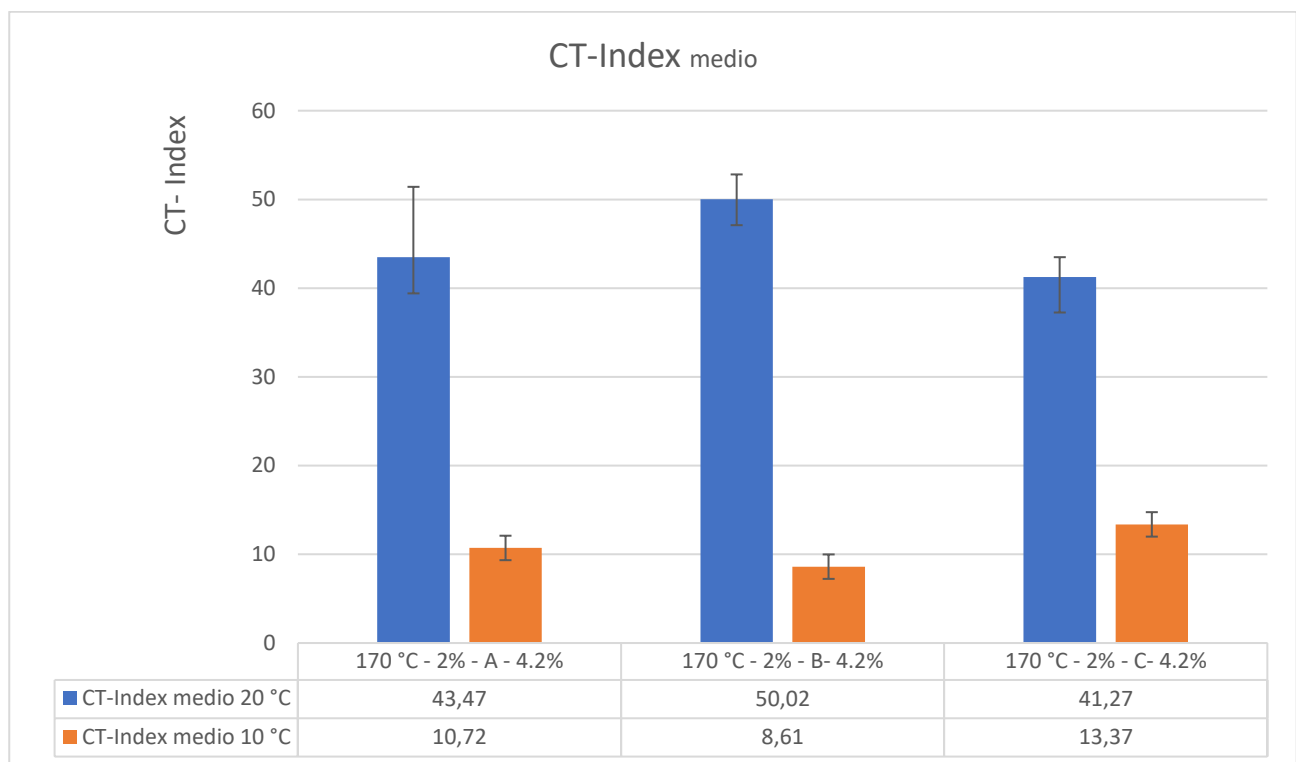


Fig. 81 – CT-Index al variare della temperatura

La temperatura dei provini influenza la duttilità in maniera simile le varie tipologie, presentando valori CT-Index 10°C minori rispetto a quelli ottenuti a 20°C, ma comunque confrontabili tra loro.

Risultati prova SCB a 10 °C

Dai risultati della prova SCB ad una temperatura di 10°C, effettuata su miscele contenenti il 2% di plastiche e 4,2% di bitume, si evince che la tenacità a frattura quindi la resistenza all'apertura di fessure, non varia con le tipologie, con esigue differenze tra loro. L'energia alla frattura, allo stesso modo, presenta risultati confrontabili, con un leggero decremento partendo rispettivamente dalla tipologia A, B e C.

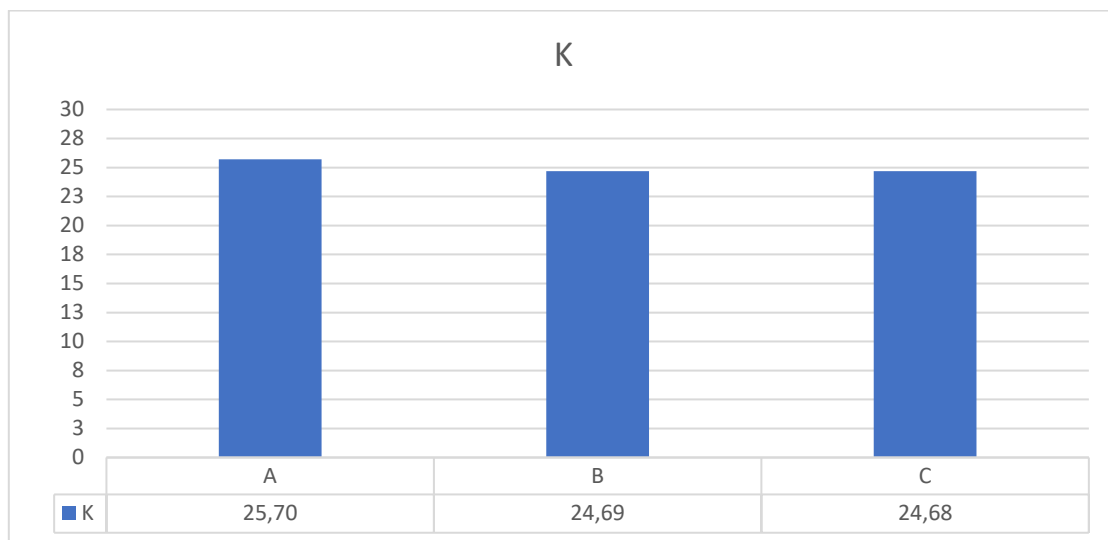


Figura 82 – Tenacità a frattura sulle diverse tipologie

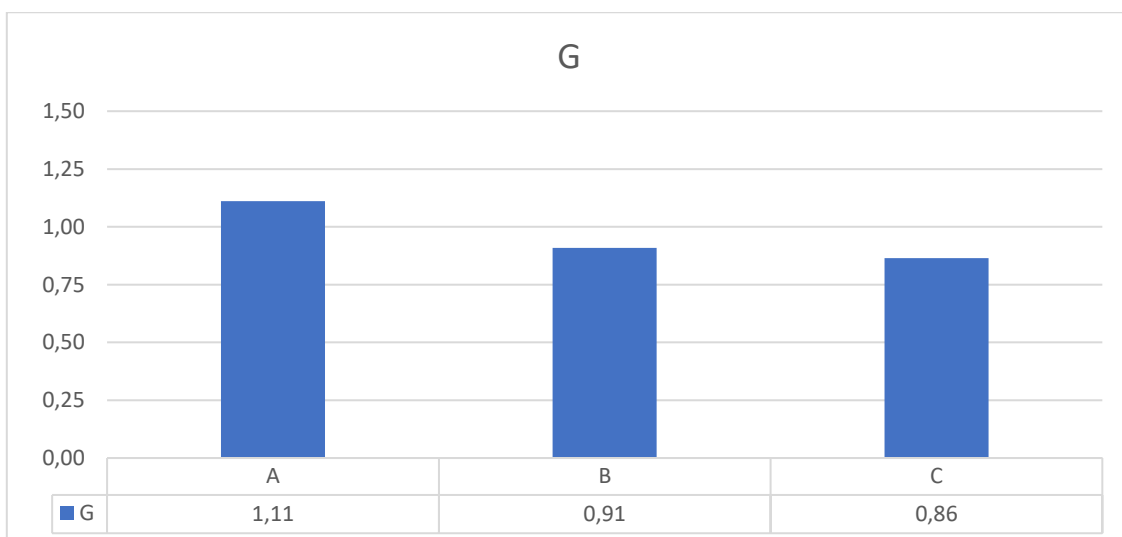


Figura 83 – Energia a frattura sulle diverse tipologie

Osservazione sull'estrazione del bitume

Dai frammenti di tre impasti (A-1%, B-2%, C-2%) residui delle prove di Resistenza a Trazione Indiretta si è proceduto all'estrazione del bitume.

Rispetto alla procedura ordinaria sono stati eseguiti due cicli di lavaggio in più.

Il materiale uscito dall'estrattore, come risulta dalle figure successive, contiene vari cluster di aggregati e pezzi di plastica che non si sono sciolti.

Nella miscela di aggregati estratti dall'impasto con l'1% di plastiche in foglia (tipo A) sono presenti dei pezzi di plastica di grosse dimensioni (alcuni cm) che non si sono sciolti durante la miscelazione, assai rari i cluster di aggregati e quasi del tutto assenti i piccoli pezzi (frammenti e/o grumi) di plastica passanti al setaccio da 1mm e trattenuti dai setacci sottostanti. Negli aggregati estratti dalle miscele B (plastiche estruse) e C (plastiche densificate) sono stati trovati cluster di aggregati che non sono stati "sciolti" dai lavaggi con solvente, quindi tenuti insieme dalla sola plastica. Dalle foto non si riescono a vedere, ma nei trattenuti ai setacci inferiori al setaccio da 1mm sono presenti residui di plastica molto fina (piccoli granuli) identificabili dal colore scuro rispetto al colore chiaro della sabbia calcarea.



Fig. 84 – Aggregati estratti dalla miscela con 1% di plastiche tipo A

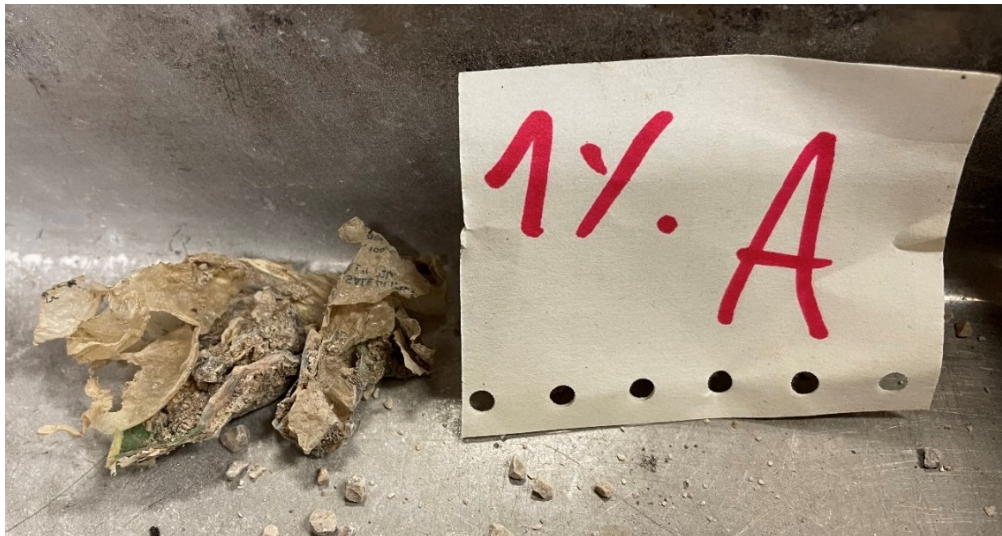


Fig. 85 – Pezzo di plastica estratto dalla miscela con 1% di plastiche tipo A



Figura 86 - Aggregati estratti dalla miscela con 2% di plastiche tipo B

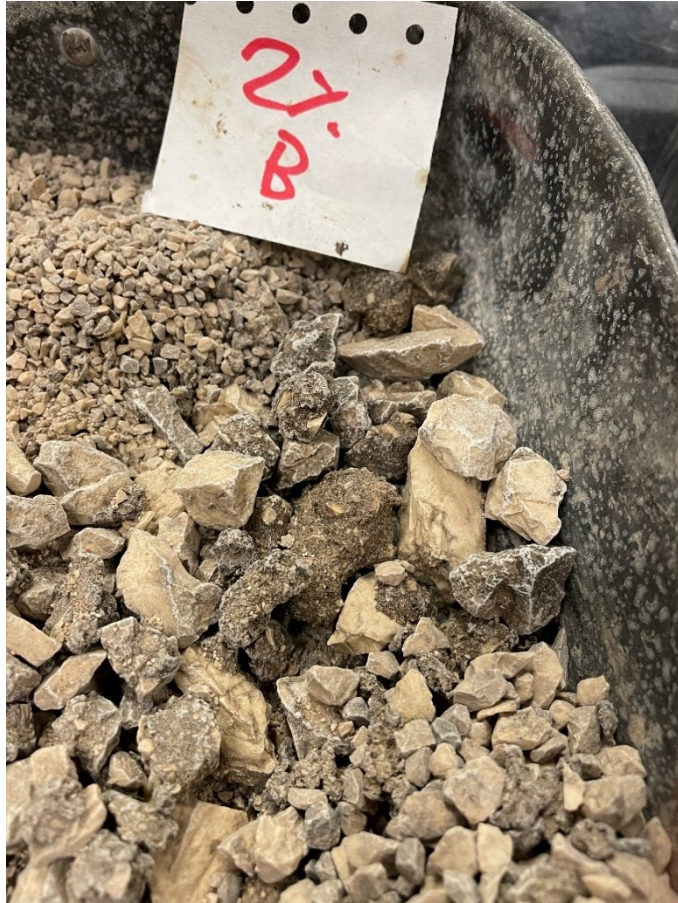


Fig. 87 – Cluster di aggregati rinvenuto dopo l'estrazione dalla miscela con 2% di plastiche tipo B



Fig. 88 – Aggregati estratti dalla miscela con 2% di plastiche tipo C



Figura 89 - Cluster di aggregati rinvenuto dopo l'estrazione dalla miscela con 2% di plastiche tipo C

A titolo informativo si inseriscono la % di bitume risultante dalle estrazioni, ma essendoci i cluster e pezzi di plastica con diversa massa volumica non risulta rappresentativo.

Miscela	% bitume
A – 1%	4,9
B – 2%	4,3
C – 2%	5,7

Tab. 25 – Percentuale di bitume ottenuta a seguito delle estrazioni

In definitiva, nonostante siano presenti cluster di aggregati e pezzi di plastiche non sciolti nelle varie tipologie, come evidenziato anche dai risultati volumetrici sui provini A che non cambiano aumentando il contenuto di plastiche, non sembrerebbe questo innescare fenomeni di fragilità dovuti a punti di discontinuità. Difatti, aumentando il contenuto di plastica si è visto che c'è un andamento proporzionale del valore di resistenza a rottura ITS, anche se in generale si correla ad una maggiore fragilità della miscela.

CONCLUSIONI

Lo studio di conglomerati bituminosi innovativi contenenti plastiche provenienti da RSU tramite mix design volumetrico, nell'ottica della sostenibilità ambientale dei materiali vergini e come metodo per combattere i rifiuti di plastica, ha prodotto risultati soddisfacenti. In particolare, dalla sperimentazione oggetto della presente tesi, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- in tutte le miscele contenenti plastica è stato riscontrato un contenuto di vuoti residui minore rispetto alla miscela di riferimento, dettate probabilmente da un maggior addensamento dovuto alle plastiche sciolte;
- riducendo il contenuto di bitume dal 4,9% al 4,2 %, su tutte le miscele contenenti plastica al 2%, il contenuto dei vuoti è aumentato rientrando all'interno delle prescrizioni dettate da ANAS, attestandosi sempre su valori leggermente inferiori rispetto al riferimento. Quindi, l'utilizzo di plastica ha fatto diminuire il contenuto di bitume necessario per ottenere un conglomerato bituminoso avente vuoti residui ottimali;
- le miscele sperimentate contenenti plastica hanno riscontrato un valore ITSM maggiore rispetto a quello di riferimento;
- a parità dei dosaggi analizzati, per miscele con contenuti del 1% e 2% di plastiche, non si sono riscontrate variazioni significative tra le tipologie, con valori del modulo raddoppiati rispetto al riferimento;
- a parità di tipologia, in tutti i casi, aumentando il contenuto di plastiche è aumentata la rigidità a trazione indiretta;
- la riduzione del contenuto di bitume non ha influenzato in maniera significativa la rigidità delle miscele;
- le miscele sperimentali contenenti plastiche hanno rilevato un valore di ITS maggiore rispetto a quella di riferimento, con un andamento crescente, proporzionale ai dosaggi di plastica. Non sono state riscontrate variazioni significative tra le tipologie di plastica impiegata;
- le miscele 1% B, 2% B e 2% C hanno evidenziato valori di ITS che non rientrano all'interno delle prescrizioni del capitolato ANAS;
- la riduzione del contenuto di bitume ha comportato diminuzioni del valore ITS pressoché trascurabili, permettendo però solo alla miscela 2% B di rientrare nei limiti delle specifiche descritte in precedenza;

- la miscela di riferimento presenta valori di CT-index più alti rispetto a tutte le miscele contenenti plastiche, questo porta a dire che l'aggiunta di plastica da RSU tende ad aumentare la fragilità del conglomerato bituminoso. Aumentandone il dosaggio, tale fragilità tende ad aumentare, come testimoniato da valori di CT-index sempre minori. La riduzione del contenuto di bitume ha portato ad un ulteriore incremento della fragilità.
- nonostante, a seguito della miscelazione, visivamente permangono pezzi di plastica non sciolti all'interno della miscela sfusa, tale fenomeno sembrerebbe non dare problemi di compattabilità e fragilità importanti. Tale frazione di plastica non sciolta è stata osservata molto chiaramente anche a seguito dell'estrazione del bitume dal conglomerato bituminoso.

Pertanto, l'utilizzo di plastica da RSU all'interno del conglomerato bituminoso sembrerebbe un intervento fattibile, che produce un contenuto di vuoti residui minore rispetto alla miscela di riferimento, compensabile attraverso la riduzione del quantitativo di bitume. La miscela produce in generale un incremento significativo dei moduli elastici e dei valori a rottura, in alcuni casi superiori a quelli imposti dai capitolati ANAS. Inoltre, si riscontra un aumento significativo della fragilità, sulla quale incide ulteriormente la riduzione del quantitativo di bitume. Situazione che peggiora ulteriormente alle basse temperature, portando potenzialmente a fessurazioni termiche.

In definitiva bisogna accettare che l'impiego di plastica ha indubbi benefici come la riduzione del contenuto di bitume a parità di caratteristiche volumetriche, ma allo stesso modo crea miscele in alcuni casi troppo rigide e fragili, che potrebbero avere una vita utile minore, quindi bisognerà fare le giuste valutazioni, per trarre a pieno i benefici da questa tecnica innovativa di impiego della plastica nell'ambito stradale.

La considerazione finale riguarda la potenziale produzione in impianto, che potrebbe riscontrare difficoltà operative di gestione, poiché come accaduto in laboratorio potrebbero rimanere cartocci di plastica attaccati ai macchinari, portando a quantitativi all'interno della miscela non corretti e pulizia apparecchiature resa più difficoltosa.

Ulteriori e future prove, come ad esempio quelle a fatica, dovranno essere condotte per analizzare in maniera completa ed esaustiva la possibilità di poter produrre e stendere conglomerato bituminoso contenente la plastica da RSU senza pregiudicarne le prestazioni.

Bibliografia

- [1] IJSR - INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH - Utilization of Plastic Waste in Construction of Roads di Vatsal Patel, Snehal Popli e Drashti Bhatt
- [2] American Journal of Engineering Research (AJER) Reuse of Waste Plastics Coated Aggregates-Bitumen Mix Composite For Road Application – Green Method di S. Rajasekaran, Dr. R. Vasudevan, Dr. Samuvel Paulraj
- [3] Utilization of Liquid Plastic Waste in Bitumen for Construction of Roads - D. C. Rahi, R. Chandak e Amit Vishwakarma
- [4] Santagata F.A., et al., STRADE: Teoria e tecnica delle costruzioni stradali, Volumi 1 e 2, Milano, Torino, Pearson Italia, 2016
- [5] I quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture. Volume V, Le pavimentazioni stradali: Prontuario per la progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori sul piano viabile, Anas S.p.A., 2019.
- [6] <https://www.stradeanas.it/it/lazienda/attivita%20documenti-tecnici>
- [7] Schede tecniche e manuali delle apparecchiature da laboratorio impiegate nel lavoro sperimentale trattato
- [8] Asphalt Modified Plastic Waste To Defend Damage In Asphalt Concrete di Mahmuda, Sumiati and Lina Flaviana