

Università Politecnica delle Marche



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Analisi prestazionale di conglomerati bituminosi con plastiche da RSU comprese

“Performance Analysis of Asphalt Mixtures Containing Compressed Plastic from
Solid Municipal Waste”

RELATORE:

Prof. Maurizio Bocci

CORRELATORE:

Ing. Carlo Carpani

TESI DI LAUREA DI:

Valerio Raimondo

Anno Accademico 2021-2022

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	STATO DELL'ARTE.....	2
2.1	IL CONGLOMERATO BITUMINOSO	5
2.1.1	<i>Conglomerato bituminoso tradizionale.....</i>	5
2.1.2	<i>Conglomerato bituminoso modificato</i>	6
2.2	SOSTENIBILITÀ.....	6
2.2.1	<i>Sostenibilità in campo stradale</i>	8
2.2.1.1	Fattori economici.....	10
2.2.1.2	Fattori ambientali	10
2.2.1.3	Fattori sociali	12
2.2.2	<i>Problema dello smaltimento dei rifiuti e del riciclo</i>	13
2.2.3	<i>Riciclo del conglomerato bituminoso</i>	15
2.2.4	<i>Economia circolare</i>	18
2.2.5	<i>L'inquinamento dei rifiuti di plastica</i>	19
2.3	UTILIZZO DEI RIFIUTI PLASTICI NEL CONGLOMERATO BITUMINOSO	22
3	PROGRAMMA SPERIMENTALE	23
3.1	MATERIALI	24
3.1.1	<i>Aggregati.....</i>	24
3.1.1.1	Sabbia 0/6.....	34
3.1.1.2	Graniglia 4/8.....	36
3.1.1.3	Pietrisco 8/12	37
3.1.1.4	Pietrisco 12/25	39
3.1.1.5	Filler	40
3.1.2	<i>Bitume</i>	42
3.1.3	<i>Plastica da rifiuti solidi urbani</i>	46
3.2	METODOLOGIE DI CONFEZIONAMENTO E PROVE	47
3.2.1	<i>Mix Design.....</i>	47
3.2.2	<i>Realizzazione dei provini</i>	49
3.2.3	<i>Compattatore a taglio giroscopico.....</i>	55
3.2.4	<i>Determinazione delle caratteristiche di addensamento.....</i>	61
3.2.5	<i>Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM-Indirect Tensile Stiffness Modulus)</i>	70
3.2.6	<i>Prova di trazione indiretta (ITS-Indirect Tensile Strenght)</i>	84
3.2.7	<i>Specifiche di capitolato</i>	88
3.2.8	<i>Prova a fatica (ITFT- Indirect Tensile Fatigue Test)</i>	90
3.2.9	<i>Estrazione del bitume dal conglomerato e controllo della plastica sciolta</i>	95
4	RISULTATI	98
4.1	ADDENSAMENTO.....	98
4.2	VUOTI	99
4.3	MODULO	100
4.4	RESISTENZA A TRAZIONE INDIRETTA	101
4.5	RESISTENZA A FATICA.....	103
5	CONCLUSIONI	108
6	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	110

1 INTRODUZIONE

La continua evoluzione della società, in un contesto di globalizzazione estremamente elevato, necessita quotidianamente di servizi e di risorse per le persone.

I bisogni principali di ogni individuo, non coincidenti necessariamente con quelli primari, sono in continuo aumento e con essi l'esigenza di spostamenti sempre più rapidi per garantire un'interconnessione tra le varie realtà.

Queste necessità hanno reso indispensabile lo sviluppo delle infrastrutture stradali, la cui crescita esponenziale degli ultimi anni, ha spinto l'ingegneria civile alla ricerca di tecniche per la realizzazione delle strade con caratteristiche funzionali e prestazionali sempre più elevate. La crescente preoccupazione di natura ambientalistica e, non ultimo, ragioni di risparmio economico, hanno polarizzato l'attenzione sui materiali utilizzati e soprattutto sulle tecniche di riciclaggio dei materiali di scarto che diventano via via sempre più innovative.

Il recupero di questi materiali si propone come un'interessante alternativa da considerare in campo stradale in sede progettuale perché permette di abbattere i costi connessi allo smaltimento del materiale destinato altrimenti a discarica, nell'ottica lungimirante di limitare il consumo delle risorse non rinnovabili presenti sul pianeta, tutelando in questo modo l'ambiente, in linea con il concetto di sostenibilità.

Nei decenni passati si credeva infatti di poter disporre di una riserva illimitata di materie prime e che la natura e la quantità dei rifiuti non rappresentassero un effettivo problema di smaltimento. Oggi si può affermare che tale politica non è più ambientalmente sostenibile.

Con l'obiettivo di mirare ad una più accorta gestione dei rifiuti, sovente la ricerca scientifica nei vari settori dell'ingegneria affronta problematiche concernenti il riutilizzo dei materiali di scarto in sostituzione di quelli naturali. In considerazione di quanto detto, il presente studio è indirizzato a ricercare soluzioni alternative all'impiego delle materie prime nel settore dell'ingegneria civile. L'obiettivo è stato di guardare al rifiuto non più come a un costo o un onere cui dover far fronte, bensì come una risorsa da valorizzare.

Lo studio in oggetto ha perciò valutato, mediante analisi di laboratorio e basandosi sull'esperienza pregressa della ricerca scientifica, la possibilità di impiegare alcune tipologie di plastiche provenienti dalla raccolta differenziata nella tecnica delle costruzioni stradali, al fine di raggiungere e migliorare le caratteristiche tecnico-prestazionali delle miscele bituminose tradizionali e di smaltire nel contempo un adeguato quantitativo di rifiuto altrimenti destinato a discarica.

Il programma sperimentale oggetto di questa tesi si basa sulla tecnica di riciclaggio di plastiche provenienti da rifiuti solidi urbani (RSU) nel confezionamento a caldo di un conglomerato bituminoso, oggetto di una ricerca commissionata all'Università Politecnica delle Marche da parte di Anas; in concordanza con questa impresa sono stati definiti sia i metodi che le modalità operative della sperimentazione.

Dopo lo studio della composizione granulometrica e della percentuale di bitume per la definizione del Mix Design da adottare, sono stati confezionati i provini contenenti le plastiche da RSU sui quali sono state svolte le indagini sperimentali seguendo il programma operativo. Si sono poi determinate le proprietà volumetriche, studiate le caratteristiche meccaniche mediante prove di modulo a trazione indiretta (ITSM), ed effettuate prove di resistenza a trazione indiretta (ITS) e prove a fatica (ITFT).



Figura 1.1-UNIVPM e Azienda Nazionale Autonoma delle Strade Statali

2 STATO DELL'ARTE

La pavimentazione stradale è per definizione quella struttura sovrastante un rilevato o il terreno in sito nelle trincee, atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, con lo scopo di assolvere a diverse funzioni:

- conferire caratteristiche superficiali di planarità ed aderenza, assicurando una circolazione confortevole e sicura;
- dissipare in profondità gli sforzi e le pressioni trasmesse dalle ruote veicolari (in relazione alla pressione di gonfiaggio degli pneumatici), affinché l'intero pacchetto stradale possa resistere ad un elevato numero di passaggi, il più a lungo possibile;
- proteggere la pavimentazione stessa ed il terreno sottostante da agenti atmosferici pericolosi per la stabilità del piano viabile (dal gelo in particolare).

La pavimentazione stradale è costituita da vari strati, ciascuno con caratteristiche proprie, composizionali e funzionali, che spesso possono raggiungere anche la profondità di un metro; i tre elementi principali che la compongono sono: il manto, la struttura ed il sottofondo.

Il manto è la parte più superficiale della pavimentazione, e in quanto tale rappresenta il primo contatto con il carico; deve perciò essere dotato di resistenza notevole e caratteristiche geometriche perfette: i materiali utilizzati dovranno pertanto avere delle formulazioni compositive specifiche, che non solo assolvano alle funzioni richieste, ma le mantengano elevate nel tempo, affinché la vita utile della pavimentazione stessa sia la più lunga possibile. Il manto effettuerà una protezione di tutta la struttura della pavimentazione, in particolare nei confronti di due elementi: l'elemento traffico e l'elemento ambiente. La protezione dal traffico è relativa sia ai carichi trasmessi dalle ruote, sia anche all'azione di sfregamento esercitata dagli pneumatici stessi, con conseguente abrasione della superficie, perdita di attrito e inevitabile aumento della pericolosità. La protezione dall'ambiente invece, deriva da due principali forme di attacco: gli effetti termici, che conferiscono alla pavimentazione continue contrazioni e dilatazioni, ed il deterioramento provocato dal sole, da cui assorbono quotidianamente raggi ultravioletti, che ne accelerano l'invecchiamento; per ovviare a questi tipi di attacco, il manto risultante, dovrà pertanto essere elastico e durevole.

Il bitume è certamente uno dei leganti più utilizzati per questo tipo di strato, con uno spettro di utilizzo che va da strade a traffico intenso, a strade a traffico ridotto.

La struttura permette il trasferimento del carico dal manto al sottofondo. Anch'essa è composta da vari strati, con materiali e caratteristiche di resistenza differenti. Ogni strato riceve un carico dallo strato sovrastante, e lo diffonde su un'area più ampia della parte sottostante; chiaramente le sollecitazioni maggiori saranno nella parte superiore della pavimentazione, e pertanto ad essa verranno richieste caratteristiche di resistenza più elevate. Inoltre, queste stesse caratteristiche saranno rapportate alla tipologia di carico, ossia al livello di traffico presente, legato alla sua ritmicità, ma anche alla classificazione dei veicoli che percorrono la strada stessa, che potranno essere di tipo pesante, leggero o a due ruote. La struttura è composta a sua volta da materiali granulari e da materiali legati: i primi, comprendenti pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli; tuttavia, a seguito dei carichi ripetuti e all'avvicinarsi dei granuli stessi gli uni agli altri, si potrebbe verificare un graduale "addensamento" in qualsiasi strato della struttura, e che avrebbe come diretta conseguenza una deformazione superficiale, con un andamento tipico di solchi in corrispondenza dell'area di passaggio (impronta) delle ruote; i materiali legati invece, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, hanno il compito di ricevere i carichi verticali, che generano sollecitazioni di flessione, ossia trazione nella metà inferiore e compressione nella metà superiore, a causa del continuo passaggio di veicoli, con conseguente rottura a fatica: si creano infatti delle fessure nella parte inferiore dello strato, che si propagano verticalmente e che risalgono lungo la struttura, man mano che le ripetizioni di carico proseguono.

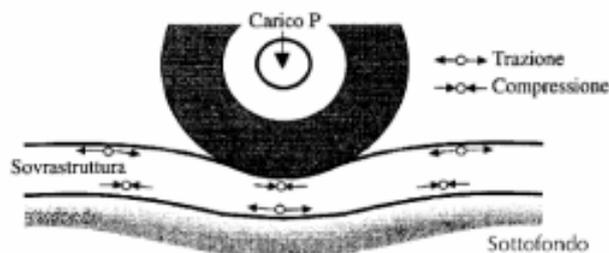


Figura. 2.1: Sollecitazioni flessionali di una struttura stradale

Il sottofondo è costituito da terreno naturale, alla base del corpo stradale; le caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati, determinano una maggiore o minore resistenza del sottofondo stesso, influenzando la scelta del tipo di struttura sovrastante da adottare, che dovrà garantire una distribuzione del carico tale da non causare deformazioni permanenti.

Analizzando più in dettaglio gli strati che costituiscono una pavimentazione, possiamo distinguere, partendo dall'alto:

- uno strato di usura, in conglomerato bituminoso;
- uno strato di collegamento, in conglomerato bituminoso, denominato "binder";
- uno strato di base, sempre in conglomerato bituminoso;
- uno strato di sottobase in misto cementato, utilizzato solamente per strade e autostrade

con un volume notevole di traffico pesante;

- uno strato di fondazione, in misto granulare, stabilizzato meccanicamente (per mezzo di rulli compattatori particolari);
- uno strato di sottofondazione, utilizzato per strade a ridotto o nullo volume di traffico pesante, in sostituzione della fondazione, o nei casi in cui il terreno sia di tipo limoso o argilloso.

Anche gli spessori dei vari strati possono cambiare, in funzione della tipologia di pavimentazione, che potrà essere flessibile, semi-rigida o rigida. Si osservi come variano gli spessori nella seguente figura, in rapporto alla tipologia di pavimentazione.

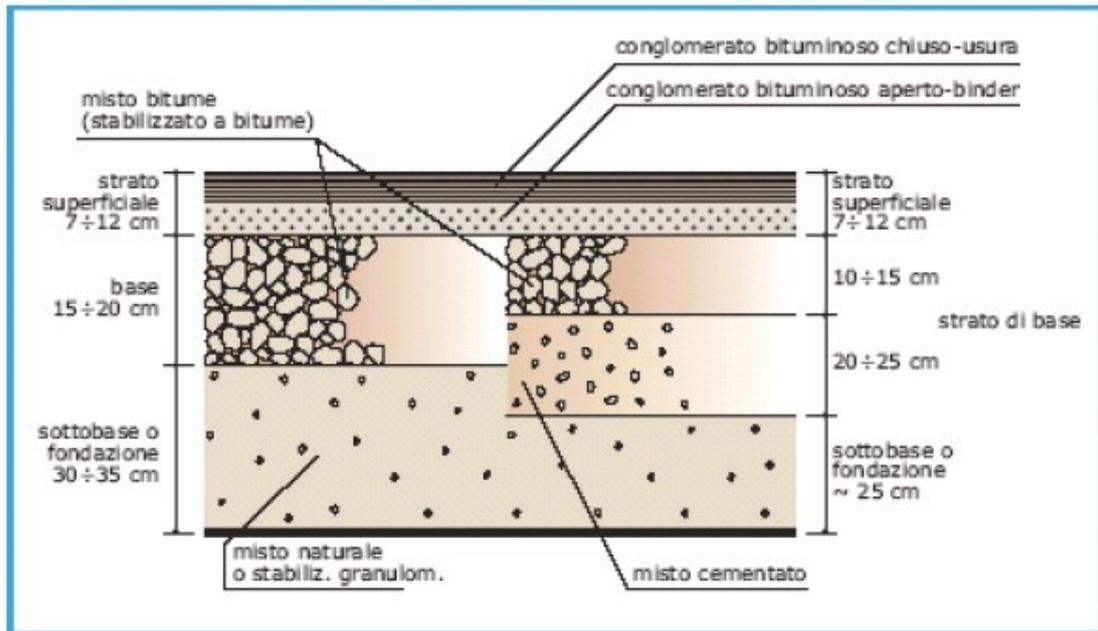


Figura 2.2: Composizione stratigrafica delle tipologie di pavimentazione stradale flessibile e semi-rigida.

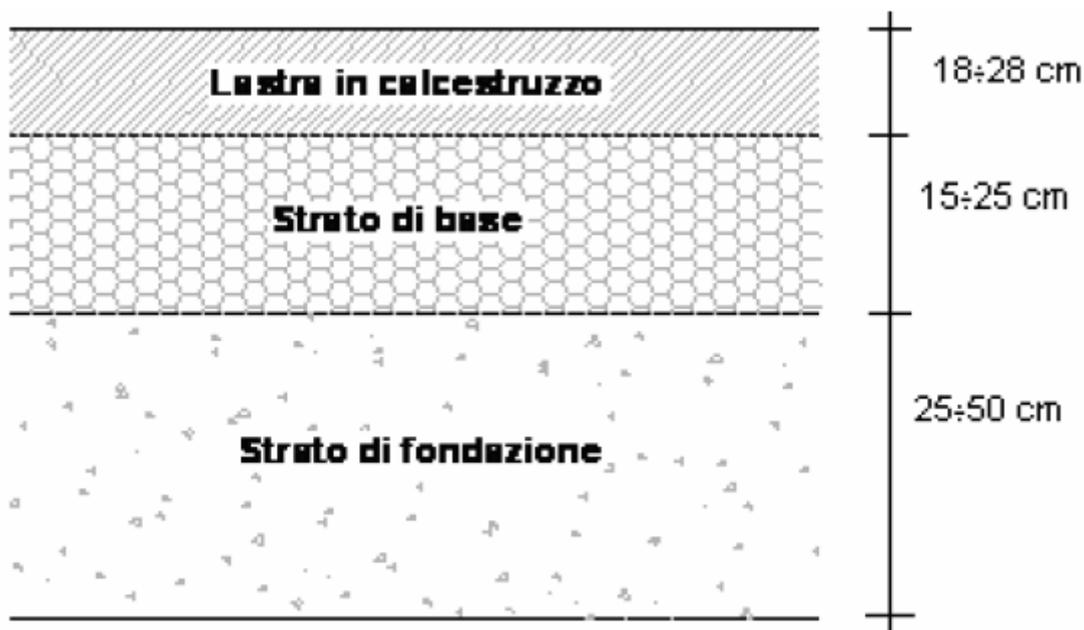


Figura 2.3: Composizione stratigrafica della tipologia di pavimentazione stradale rigida.

2.1 Il conglomerato bituminoso

Per la maggior parte delle strade urbane ed extra-urbane la tipologia di pavimentazione stradale adottata è quella flessibile o quella semi-rigida le quali sono caratterizzate dagli strati legati più superficiali costituiti dal conglomerato bituminoso.

Nel caso di pavimentazioni rigide lo strato superficiale è costituito da conglomerato cementizio e non bituminoso; questo tipo di pavimentazione è per lo più utilizzato per piazzali di sosta aeroportuali.

2.1.1 Conglomerato bituminoso tradizionale

Il conglomerato bituminoso è costituito da una miscela di aggregati di varia pezzatura (materiali rocciosi quali filler, sabbia e pietrisco) e un legante organico (il bitume) che ha la funzione di rendere coesi gli aggregati e conferire alla miscela un comportamento omogeneo e uniforme.

Viene utilizzato, di norma, per la realizzazione delle superfici carrabili (strade, piste di atterraggio, ecc.).

La diffusione di queste miscele nella costruzione delle pavimentazioni stradali è dovuta alla grande varietà di prodotti che possono ottenersi operando sulla granulometria dell'inerte, nonché sulla quantità e sulla qualità del bitume, varietà che si traduce nella possibile rispondenza a diverse esigenze (rugosità, regolarità, impermeabilità, possibilità di impiego in piccoli spessori).

È utile, pertanto, stabilire una duplice classificazione:

- 1) in base allo strato della sovrastruttura al quale sono destinati, distinguendo pertanto:
 - Conglomerati bituminosi per strati di usura;

- Conglomerati bituminosi per strati di collegamento o binder;
 - Conglomerati bituminosi per strati di base;
- 2) in base alla percentuale di vuoti o porosità, presenti dividendoli in due gruppi:
- conglomerati bituminosi aperti o drenanti (%vuoti residui $10 \div 22$);
 - conglomerati bituminosi chiusi (%vuoti residui < 6).

La porosità è funzione prevalente della granulometria: quanto più questa è continua e vicina alla curva di massima densità teorica, tanto minore è la porosità della miscela. Generalmente al diminuire della percentuale dei vuoti si incrementano le caratteristiche di resistenza meccanica dei conglomerati, questo perché aumentano i legami tra i granuli, realizzati dal bitume.

Le proprietà principali che i conglomerati bituminosi devono possedere ed esplicitare, noto il loro utilizzo negli strati superficiali, sono: stabilità, lavorabilità, durabilità, permeabilità e aderenza.

2.1.2 Conglomerato bituminoso modificato

Dall'esigenza di pavimentazioni stradali sempre più performanti nasce la necessità di realizzare diverse varianti rispetto alla composizione standard dei conglomerati bituminosi, le quali possono riguardare diversi aspetti, quali la temperatura di miscelazione dei vari componenti, la granulometria degli aggregati, la composizione chimica dei bitumi, il tipo di filler utilizzato e l'aggiunta di polimeri atti ad implementare le proprietà dei bitumi.

Per questi motivi, la ricerca sulle miscele è in continua evoluzione e oggi si può parlare di bitumi modificati (Polymer Modified Bitumens, PMB) ovvero bitumi tradizionali addizionati con polimeri. I polimeri più utilizzati per la creazione di PMB sono gli elastomeri (gomme sintetiche) e plastomeri (materie plastiche).

Tramite l'aggiunta di questi elementi si ha un miglioramento sotto molteplici aspetti:

- maggiore rigidità alle basse temperature;
- migliore resistenza all'invecchiamento;
- migliore resistenza alla fatica;
- minore suscettibilità alle variazioni di temperatura;
- maggiori capacità elastiche.

Tutti questi potenziamenti sono conseguenti all'aggiunta di una bassissima percentuale di polimeri (2 – 10% in peso). Difatti non si parla di bitume additivato ma modificato.

2.2 Sostenibilità

La sostenibilità è essenzialmente la capacità di durare e resistere nel tempo. La parola deriva dal latino *sustinere* (da *sus*, su e *tenere*, tenere) e diverse sono le definizioni presenti nel dizionario: dare supporto, prolungare e supportare/sostenere. Oggi il termine è molto inflazionato ed è applicato genericamente ad ogni aspetto della vita, sebbene sia sempre più spesso impiegato nel contesto della sostenibilità umana sulla Terra.

Nel suo rapporto del 1987 la Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo (Brundtland-Commission of the United Nations) ha definito il concetto di sviluppo sostenibile nella maniera seguente: "Soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni". La prima grande manifestazione della diffusione di tale concetto avvenne durante la Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo (Earth Summit) nel 1992.

Da allora, governi e organizzazioni a livello nazionale, regionale e locale hanno tenuto in considerazione il concetto di sostenibilità nelle loro politiche e programmi e hanno fatto progressi per implementare il concetto nella loro pratica. Negli ultimi anni è stato sottolineato come sia necessario bilanciare accuratamente le richieste economiche, sociali e ambientali, affinché uno sviluppo sostenibile possa realizzarsi. Nella Figura 2.4 è rappresentato graficamente l'equilibrio tra questi fattori, che sono definiti come i “tre pilastri della sostenibilità”.

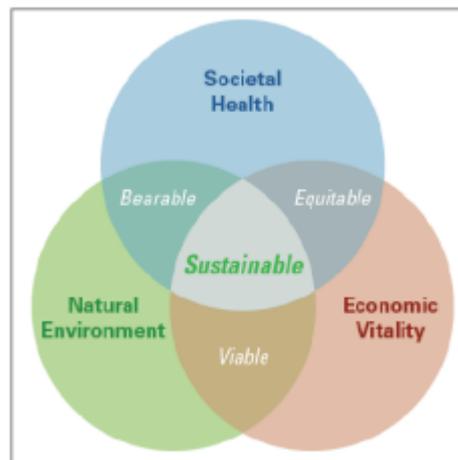


Figura 2.4: I tre pilastri della sostenibilità.

Cercare soluzioni per uno sviluppo economico e sociale sostenibile significa tentare di coniugare il bisogno crescente e generalizzato di ricchezza e qualità della vita con una dotazione necessaria e sufficiente di risorse, capaci di supportare un tale livello di sviluppo. Il rapporto tra sviluppo sostenibile ed economia è evidente: parlando di sviluppo si fa riferimento, in primo luogo, a un processo di produzione di valore, ma è la sostenibilità a introdurre alcuni elementi nuovi. Il primo è quello che impone di quantificare la produzione di valore mettendo nel conto anche gli eventuali impatti di degrado che le attività umane possono determinare sugli ecosistemi. La produzione di valore sostenibile si basa, infatti, sul riconoscimento degli ecosistemi naturali come fattori imprescindibili dello sviluppo e quindi suscettibili di valutazione economica. Il grado di innovazione tecnologica che caratterizzerà il prossimo futuro influenzerà l'incremento e il recupero di efficienza delle attività umane nello sfruttamento degli ecosistemi.

La sostituzione di risorse e materie prime naturali con sottoprodotti derivanti da processi di produzione e di consumo dipende da soluzioni tecnologicamente innovative. Investimenti in ricerca e sviluppo possono costituire la base per costruire una nuova autonomia delle attività umane dagli ecosistemi naturali, in una prospettiva che non sancisca un dominio distruttivo dell'uomo sulla natura, ma che ne consenta lo sviluppo. Ciò si può realizzare preservando per quanto possibile l'ambiente attraverso un più razionale impiego di risorse naturali il cui potenziale deve essere massimizzato nei cicli produttivi in cui tali risorse concorrono. Esse devono rimanere nel tempo in quantità e qualità adeguate a poter supportare la crescita; affinché questo accada si dovranno rispettare le seguenti condizioni:

- i consumi di risorse rinnovabili non devono superare i relativi tassi di rigenerazione;
- i consumi di risorse non rinnovabili non devono superare la velocità di ritrovamento o di sviluppo di risorse sostitutive (possibilmente rinnovabili);
- le emissioni di inquinanti non devono superare la capacità di recupero dell'ambiente.

Sostenibilità è quindi un concetto sistemico, che si relaziona alla coesistenza dei fattori economici, sociali e ambientali della società umana. Essa è concepita come un mezzo di configurazione per la civilizzazione e l'attività umana affinché la società, i suoi membri e le sue economie siano capaci di soddisfare i propri bisogni ed esprimere il loro più grande potenziale nel presente. Nel contempo occorre sempre tenere presenti la biodiversità e gli ecosistemi naturali pianificando e agendo al fine di mantenerli nel lungo termine. La sostenibilità ha influenza a ogni livello di organizzazione, dal vicinato locale all'intero pianeta. I governi, le imprese e i cittadini devono partecipare attivamente affinché essa si possa realizzare, modificando il proprio stile di vita e predisponendo tutta una serie di strumenti e misure (es. normative, incentivi, regolamentazioni) che vadano di pari passo con il progresso tecnico e tecnologico. Per misurare la sostenibilità dello sviluppo e valutare se le politiche adottate portino al raggiungimento di questo obiettivo, bisogna conoscere lo stato di partenza e ricercare possibili indicatori di sostenibilità che semplifichino e quantifichino la realtà. Secondo l'International Institute for Sustainable Development, questi indicatori devono essere selezionati sulla base dei seguenti criteri:

1. significatività ai fini della valutazione della sostenibilità;
2. rilevanza per la realtà in esame;
3. misurabilità e convenienza;
4. comprensibilità;
5. sensibilità;
6. coerenza;
7. capacità di sintesi;
8. affidabilità;
9. disaggregabilità;

Gli indicatori sono quindi strumenti di misurazione che descrivono sinteticamente fenomeni anche molto complessi.

2.2.1 Sostenibilità in campo stradale

Le esigenze e i vincoli di sviluppo nel campo delle costruzioni stradali, così come in tutti gli altri campi dell'ingegneria civile, non differiscono da quelli degli altri settori della vita sociale; la considerazione della sostenibilità e di pratiche sostenibili assume un ruolo centrale e focalizza quindi l'attenzione su una molteplicità di aspetti: il design strutturale, i materiali impiegati nell'infrastruttura, il processo costruttivo stesso e tutto ciò che è sotto il diretto controllo dell'ingegnere stradale.

Temi come il riciclaggio, uso di scarti/sottoprodotti industriali, conservazione delle risorse, inquinamento da CO₂ ed anche energia associata tendono ad acquisire un notevole interesse in tale contesto.

Nasce così la necessità di caratterizzare e quantificare in termini di sostenibilità ogni aspetto dell'infrastruttura stradale, dalla sua concezione e progettazione alla costruzione,

dall'esercizio in opera e manutenzione fino al termine della vita utile. Il miglior modo di determinare la sostenibilità di una scelta infrastrutturale sarebbe quello di impiegare una metodologia che misuri e quantifichi i fattori economici, ambientali e sociali influenzati dalla pavimentazione durante tutto il suo ciclo vitale. La Figura 2.5 riassume il concetto di sostenibilità applicato al campo stradale.

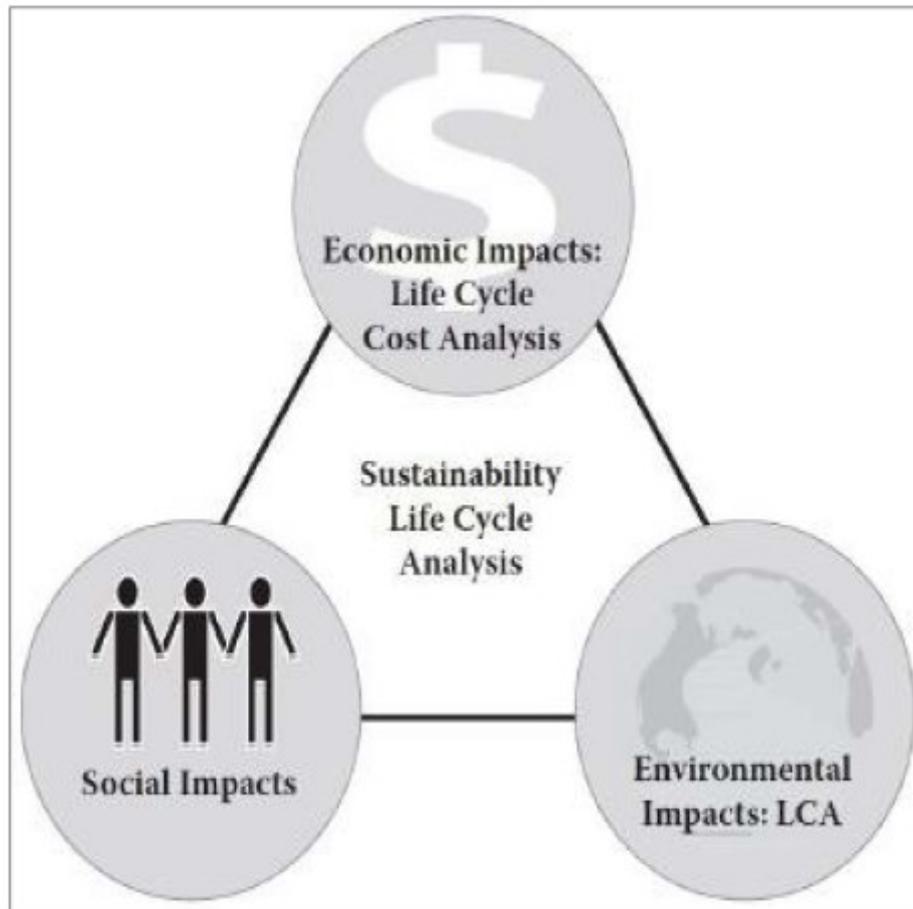


Figura 2.5: La sostenibilità in campo stradale.

Tale metodologia potrebbe essere utilizzata in diversi modi:

- analisi della pratica corrente e valutazione dei miglioramenti quando vengono introdotti;
- comparazione di diversi sistemi e soluzioni su base di giudizio oggettivo;
- valutazione dei benefici relativi riguardo ad approcci alternativi in termini di design, selezione dei materiali, ecc.

Al momento una metodologia completa di valutazione non è ancora pronta per essere implementata; sebbene i fattori economici siano stati identificati e possano essere misurati, un insieme di fattori ambientali e sociali appropriati non è ancora stato identificato, o generalmente accettato dall'industria ed i corrispondenti strumenti di misura non sono disponibili.

2.2.1.1 Fattori economici

In ogni progetto o per ogni sistema la buona pratica ingegneristica si prefigge il bilanciamento tra il bisogno di minimizzare i costi economici con la necessità di massimizzare l'efficienza, la qualità e la longevità. Tale equilibrio non può concentrarsi esclusivamente sulla riduzione dei costi iniziali di realizzazione, poiché ciò limiterebbe notevolmente l'operato dell'ingegnere e precluderebbe l'opportunità di prendere le giuste decisioni per la sostenibilità a lungo termine dell'infrastruttura.

L'approccio più adeguato per una corretta valutazione economica dovrebbe analizzare i costi dell'intero ciclo vitale di un sistema, adottando una procedura d'analisi del tipo: Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Un tale metodo è basato su criteri economici che considerano il valore temporale del denaro, i costi iniziali, quelli futuri previsti e il valore ultimo alla fine del periodo di servizio. Nella pratica, però, la maggior parte degli approcci LCCA utilizzati dalle società appaltatrici include solamente i costi sostenuti dalle stesse, quali quelli riguardanti la costruzione iniziale, la preservazione, la riabilitazione ed il valore residuo. È possibile e forse consigliabile includere nell'analisi i costi dell'utilizzatore; essi comprendono, per esempio, i costi finanziari di chi transita derivanti dalla preservazione della strada e dalle attività di manutenzione. Altri costi economici che possono essere considerati includono quelli finanziari per la tutela dell'ambiente, qualora si preveda un rilevante impatto sul contesto ambientale.

2.2.1.2 Fattori ambientali

Al centro di un'analisi dell'opera durante tutto il suo ciclo di vita, o con un approccio di tipo "inizio-fine" (end-to-end), vi è l'idea di: Life Cycle Assessment (LCA).

La Life Cycle Assessment è una metodologia che valuta l'insieme di interazioni che il prodotto o il servizio ha con l'ambiente, considerando il suo intero periodo di esercizio. La LCA considera gli impatti ambientali del caso esaminato nei confronti della salute umana, della qualità dell'ecosistema e dell'impoverimento delle risorse, considerando inoltre gli impatti di carattere economico e sociale.

L'obiettivo di questo approccio è quello di assicurare che tutti gli effetti e i fattori siano tenuti in conto nell'analisi, dal momento in cui ogni componente dell'oggetto di studio (la pavimentazione in questo caso) è estratto o processato, lungo tutto il suo percorso fino all'esaurimento della sua utilità, in coincidenza del raggiungimento del termine della vita utile dell'opera. Ciò comporta essenzialmente l'analisi cumulativa dell'impatto ambientale e della sostenibilità di un prodotto attraverso tutti gli stadi del ciclo vitale dello stesso, includendo implicazioni che non sono normalmente tenute in conto in analisi più tradizionali.

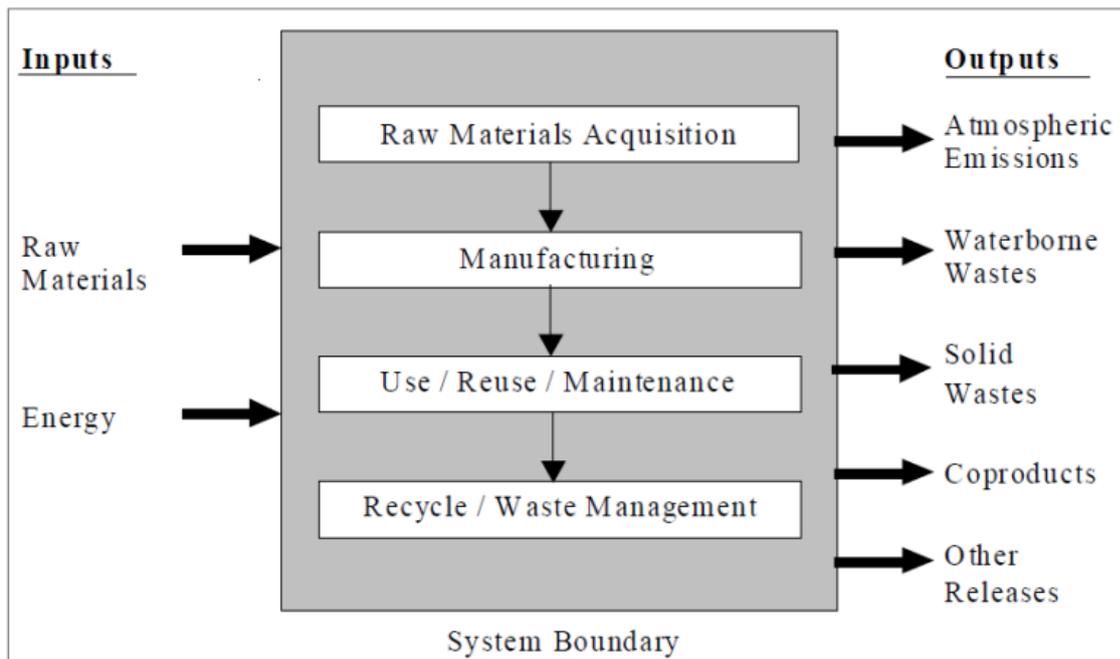


Figura 2.6: Concetto di Life Cycle Assessment.

L'uso del termine Life Cycle Assessment si riferisce quindi a tutte le maggiori attività necessarie nel periodo di vita del prodotto: pre-produzione (inclusa l'acquisizione delle materie prime necessarie), produzione, uso (incluso riuso e manutenzione), riciclaggio e dismissione finale. La Figura 2.6 illustra schematicamente il concetto di LCA, includendo i fattori d'ingresso, d'uscita e le fasi del sistema.

Nella Figura 2.7 sono richiamate le principali attività caratteristiche di una pavimentazione stradale.

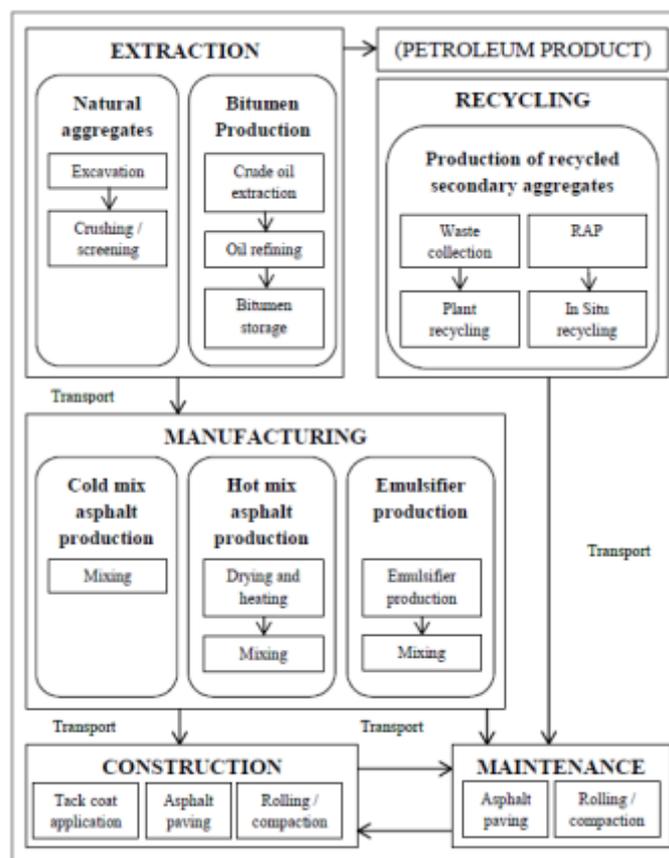


Figura 2.7: Principali processi di una pavimentazione stradale.

Nonostante la maggior parte degli approcci odierni non consideri nella valutazione della sostenibilità dell'infrastruttura stradale l'impatto de traffico durante la fase di esercizio (dato che il movimento del veicolo non è considerato come parte della strada), tale analisi consente di focalizzare l'attenzione sui diversi aspetti d'interazione tra la pavimentazione e l'ambiente: energia, emissioni, materie prime, riscaldamento globale potenziale, acqua sfruttata, materiali pericolosi, ecc.

In conclusione, i parametri raccomandati per la valutazione dell'impatto ambientale di una generica pavimentazione stradale posso essere riassunti nel modo seguente:

- energia richiesta;
- emissioni / riscaldamento globale potenziale;
- tossicità potenziale;
- consumo di materie prime;
- rifiuti generati.

2.2.1.3 Fattori sociali

La società è profondamente dipendente dall'abilità delle persone e dei beni di spostarsi rapidamente ed efficientemente da un luogo all'altro. Il livello di mobilità consentito dalla rete stradale rappresenta quindi uno dei fattori sociali critici per la sostenibilità della rete stessa. L'altro fattore sociale impattante è l'effetto che l'infrastruttura ha sulla qualità della vita delle comunità circostanti (logistica, posizionamento, livello estetico, contributo al rumore, impatti

sulla sanità, ecc.).

Nonostante l'industria della pavimentazione stradale abbia fatto grandi progressi nello sviluppo di strumenti per l'analisi dei fattori di sostenibilità descritti in precedenza (LCCA per l'analisi degli aspetti economici e LCA per quelli ambientali) nessun sistema oggettivo è ancora disponibile per valutare i fattori sociali. Alcuni dei potenziali parametri che dovrebbero essere tenuti in considerazione nella valutazione sono:

- sicurezza;
- ritardi dell'utente;
- inquinamento acustico;
- energia associata.

2.2.2 Problema dello smaltimento dei rifiuti e del riciclo

La diffusione di nuove tecnologie, di nuovi materiali e di elevati standard di vita hanno nel tempo causato un prelevamento di risorse superiore alla capacità di rinnovamento e creato una produzione di rifiuti maggiore della capacità di assorbimento degli stessi da parte dell'ambiente.

Da molti anni la ricerca affronta il tema dell'utilizzo dei materiali di riciclo nelle costruzioni stradali e gli studi sono sempre più orientati alla caratterizzazione chimico-fisica del prodotto, alla valutazione delle caratteristiche meccaniche delle miscele, alla verifica delle prestazioni in opera ed al potenziale inquinamento connesso all'impiego del prodotto.

Da molteplici processi produttivi si ottengono diversi materiali di scarto che possono essere impiegati come materie prime secondarie utilizzabili nella costruzione di pavimentazioni stradali. La loro produzione è delegata ad operatori economici che provvedono alla raccolta, alla selezione, alla lavorazione ed alla distribuzione del prodotto; l'attuale frammentazione del mercato non consente però lo stoccaggio di quantità significative: da ciò ne deriva una carenza di materiale per soddisfare la realizzazione del fabbisogno relativo alle infrastrutture, dettata probabilmente anche dalla sfiducia che ancora oggi si ha nell'utilizzare questa tipologia di materie prime, nelle cui potenzialità forse non si crede abbastanza.

A fianco del problema relativo ai rifiuti solidi, negli ultimi vent'anni ha acquisito maggiore importanza quello riguardante lo smaltimento di rifiuti quali terre e rocce di scavo, materiale derivante dalla costruzione e demolizione di edifici e sovrastrutture stradali.

Tutti questi prodotti di scarto sono raggruppabili nella categoria dei rifiuti da Costruzione e Demolizione C&D e possono essere distinti secondo il settore di provenienza in:

- rifiuti da costruzione di edifici e infrastrutture civili;
- rifiuti da demolizione totale o parziale di edifici e infrastrutture civili;
- rifiuti da costruzioni e manutenzione di strade;
- terreno e rocce provenienti da movimenti terra, opere civili e di scavo.

I suddetti rifiuti sono prevalentemente costituiti da materiali inerti classificabili come rifiuti speciali non pericolosi (CER e D.L. 22/97) e, previo idoneo trattamento, possono essere recuperati e riutilizzati nella costruzione di nuove strade, di ferrovie o nei calcestruzzi. Da un punto di vista ambientale, infatti, lo smaltimento degli scarti da C&D rappresenta una determinante negativa in termini di: occupazione di suolo, possibile inquinamento, spreco di energia e di materia "incorporata" nei rifiuti, ecc. Il loro reimpiego quali materiali da

costruzione può quindi generare un impatto positivo sull'ambiente, a cui si aggiunge la limitazione del prelievo di inerti naturali vergini, con un bilancio complessivo favorevole in termini di recupero e riciclaggio.

In Italia il settore del riciclaggio dei rifiuti inerti è stato avviato negli anni '80 e, sebbene si sia sviluppato fino ad oggi andando a costituire un vero e proprio comparto industriale, la sua crescita è avvenuta senza un adeguato controllo da parte delle istituzioni. Basti pensare che fino ad oggi non esiste un censimento ufficiale degli impianti di trattamento, non esistono dati certi e affidabili né sulla produzione di rifiuti da C&D né sulla loro gestione e non esistono norme aggiornate e strumenti tecnici relativi all'utilizzo degli aggregati riciclati.

I rifiuti da C&D possono essere suddivisi in tre categorie generali:

- frazione riutilizzabile, costituita da quegli elementi che possono essere riportati alla loro forma precedente e riconvertiti direttamente alla loro funzione originaria: finestre, inferriate di balconi, travi, ecc;
- frazione riciclabile, costituita dagli scarti riciclabili o dai rifiuti che, sottoposti a termodistruzione, forniscono energia. Il riciclaggio del materiale concerne soprattutto la frazione litoide, ma non sono esclusi legno non trattato e metalli, mentre l'utilizzo dal punto di vista termico riguarda i componenti organici, come pavimenti in PVC o legno trattato. A differenza della frazione riutilizzabile, quest'ultima non ha conservato né la forma né la funzione originarie;
- frazione inutilizzabile, costituita dai componenti indesiderati presenti nel materiale da riciclare o dalle frazioni che contengono inquinanti, da conferire in discarica o trattare separatamente.

Lo smaltimento in discarica, che in molti casi rappresenta ancora la via cui sono indirizzati i rifiuti inerti, non è solo un costo ambientale diretto (quello della discarica stessa), ma è anche una potenziale premessa all'abbandono e allo smaltimento abusivo. Il modo migliore per contrastare gli abbandoni e gli smaltimenti illeciti è quello di costruire un ciclo di recupero dei rifiuti ben funzionante, efficace ed economico.

Partendo da un sistema di recupero ben avviato, con numerosi operatori economici già presenti nel settore ed incoraggiando buone pratiche, buone tecnologie e gestioni più efficienti, diventa possibile non solo recuperare una quota maggiore dei rifiuti prodotti che sfuggono ai controlli, ma migliorare anche l'efficacia e la redditività economica delle attività di recupero.

La conseguenza naturale è l'ottenimento di maggiori prodotti riutilizzabili e prodotti di migliore qualità che consentono dei vantaggi: sostituire effettivamente materie prime vergini, con risparmio di cave e territorio, spuntare prezzi migliori e una significativa capacità di affermarsi sul mercato. L'accezione di compatibilità ambientale dimostra che il rispetto dell'ambiente può incontrare, in un percorso sinergico, l'interesse economico di un settore articolato come è quello delle costruzioni edili e civili.

Tenere distinte terre e rocce di scavo dagli altri materiali di risulta, separare i materiali lapidei inerti dagli altri prodotti di demolizione (metalli, legno ecc.), perseguire cioè la demolizione selettiva, significa recuperare buona parte di ciò che fino a ieri era solo rifiuto, riutilizzarla come nuova materia prima, quindi come un bene che ha un valore. Dai rifiuti di costruzione e demolizione si ricavano eccellenti materiali inerti riciclati, che possono essere efficacemente impiegati in sostituzione di quelli naturali in molte opere pubbliche e private (Figura 2.8). A ciò si aggiungono altri due fondamentali vantaggi: il risparmio di territorio, per la mancata

realizzazione di nuove cave e discariche ed il risparmio energetico e idrico. La produzione di inerte riciclato richiede, infatti, un minore impiego di energia e acqua, oltre alla riduzione della necessità di trasporti con mezzi pesanti.

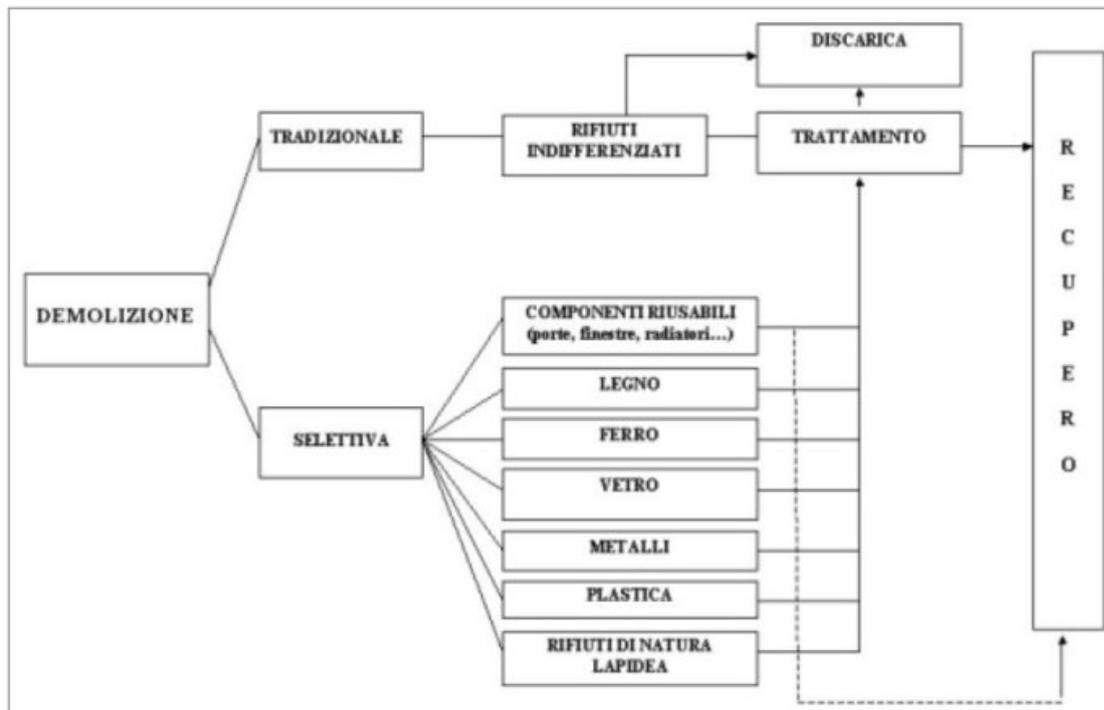


Figura 2.8: Flusso dei rifiuti da C&D. Demolizione tradizionale e selettiva.

Il processo di produzione dell'aggregato riciclato, a partire dai rifiuti C&D, non è molto diverso da quello con cui si ottengono gli inerti naturali di frantumazione dal trattamento di blocchi lapidei provenienti da attività estrattiva e non comporta sostanziali costi aggiuntivi, bensì un risparmio energetico.

2.2.3 Riciclo del conglomerato bituminoso

Nella tecnica stradale il riciclaggio è definito come il recupero ed il riutilizzo delle materie prodotte dalla dismissione degli strati di conglomerato bituminoso ammalorati per il rifacimento dei diversi strati, superficiali e portanti, costituenti le pavimentazioni stradali.

Col termine “riciclare”, si intende, quindi, qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Per conglomerato bituminoso di recupero o riciclato si fa riferimento al materiale originato dalla fresatura e dalla demolizione di pavimentazioni stradali a fine vita utile o da scarti di produzione in impianto. Fino ad oggi il conglomerato bituminoso di recupero è stato considerato un rifiuto, seppur non pericoloso in quanto non contenente catrame da carbone. Tuttavia, il Decreto 69/2018 ha ufficializzato che il fresato, se opportunamente trattato e gestito, cambia la sua qualifica da "rifiuto" a "granulato di conglomerato bituminoso". Per la realizzazione delle nuove opere, l'utilizzo di fresato deve essere previsto sin dalla fase progettuale e le Norme Tecniche devono essere redatte in modo tale da prevedere tutte le necessarie prove a garanzia di miscele bituminose prestazionali: prima (prequalifica, mix design ed eventuale campo prove), durante (verifiche di produzione) e dopo (prove in sito) la produzione e la posa in opera delle stesse.

Il fresato o conglomerato bituminoso di recupero, così come è definito dalla norma EN 13108 (*Miscela bituminose - Specifiche del materiale. Parte 8: conglomerato bituminoso di recupero*) è un prodotto, quindi, di elevate caratteristiche tecniche, totalmente riutilizzabile nell'ambito delle stesse costruzioni stradali da cui proviene. Con tale termine, o più in generale Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), si indica il materiale di rifiuto ottenuto dalla rimozione di conglomerati bituminosi in opera, quindi un vero e proprio rifiuto da costruzione e demolizione. Nella pratica il fresato bituminoso è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da un'elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato. Esso si ottiene dalla frantumazione a blocchi o dalla fresatura della pavimentazione stradale, per cui può essere correttamente definito alla stregua di un materiale inerte bitumato e non consolidato.



Figura 2.9: Conglomerato bituminoso di recupero.

La rimozione può avvenire per fresatura (da cui appunto il termine fresato) del conglomerato bituminoso tramite fresa autocarrata o per demolizione (scarifica) degli strati bituminosi per mezzo di opportuni macchinari (escavatore, ripper, scraper, ecc.) che producono blocchi a lastre irregolari di conglomerato bituminoso demolito da frantumarsi, se necessario, in seguito. Entrando nel merito delle demolizioni, nel caso in cui fosse richiesta una lieve scarifica della pavimentazione, essa si attua con una fresatrice che arriva a rimuovere conglomerato fino ad una profondità di 50 millimetri per singola passata. Volendo invece rimuovere completamente la sovrastruttura si ricorre a bulldozer o a sistemi pneumatici.

A demolizione avvenuta, per il fresato ottenuto esistono due possibilità:

- il trasporto in centrale dove verrà trattato con processi di schiacciatura, vagliatura, raccolta e stoccaggio;
- la polverizzazione in sito e la successiva incorporazione negli strati granulari, fondazione o strati di base ad opera di mezzi semoventi.

Il fresato è definito quindi dalla normativa vigente un rifiuto di costruzione e demolizione e per le sue proprietà meccaniche e fisiche può essere considerato un vero e proprio inerte con una sua curva granulometrica, generalmente caratterizzata da percentuali superiori di materiali fini e che contiene bitume invecchiato. In alcuni casi il vecchio legante può essere catrame che, provenendo dal carbone, contiene un'alta percentuale di elementi cancerogeni che ne impediscono il suo reimpiego nella realizzazione di nuove strade attraverso la tecnica del riciclaggio.

Preliminarmente è necessario il riconoscimento dei requisiti qualitativi del RAP, da valutare all'interno dell'attività di laboratorio e sotto i seguenti aspetti:

- percentuale di legante;
- vetustà del legante;
- tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- curva granulometrica.

La conoscenza delle caratteristiche del legante originario è importante sia per assicurarsi che questo sia in grado di recuperare, mediante la rigenerazione, tutte le caratteristiche perse per invecchiamento ed ossidazione, sia per valutare che esso non sia eccessivamente "duro" o rigido. Per quanto riguarda gli aggregati, che costituiscono l'elemento principale del fresato, questi possono essere calcarei o silicei; è importante stabilire la loro natura per selezionare il legante o l'agente stabilizzante più idoneo. A tal proposito è buona regola predisporre opportune prove di laboratorio, al fine di verificare la compatibilità tra gli elementi, l'opportuna lavorabilità dell'impasto, l'idonea presa finale e le caratteristiche prestazionali in esercizio.

Dal punto di vista economico la sostituzione, anche parziale, degli aggregati naturali i cui costi sono sempre più elevati, diviene sempre più economicamente vantaggiosa; ciò è anche rafforzato dal fatto che tramite sperimentazioni, sia in laboratorio sia in sito, è possibile valutarne le qualità ai fini del loro impiego nella costruzione di infrastrutture viarie. Il ricorso a tecniche di riciclaggio, quale strumento manutentorio di valorizzazione del patrimonio stradale, trova quindi più che ampia giustificazione, nella migliore salvaguardia ambientale, nella riduzione dei costi di produzione, nell'incremento della produzione e nell'eliminazione degli oneri di smaltimento dei materiali risultanti dalla demolizione delle pavimentazioni degradate. Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali è oggi possibile con tecniche a caldo, con impiego di bitumi tradizionali o modificati, e a freddo con impiego di emulsioni bituminose modificate o bitumi schiumati, per strati superficiali o profondi, sia "in impianto" che "in situ". Con la tecnica a caldo, in cui le temperature del legante e degli inerti devono essere molto elevate, si possono ottenere conglomerati bituminosi con caratteristiche fisico meccaniche molto buone, prossime a quelle dei conglomerati bituminosi nuovi. La tecnologia a freddo consente di realizzare, a partire da materiale bituminoso fresato ed emulsione bituminosa, un conglomerato bituminoso dalle caratteristiche simili a quello ottenuto con i metodi tradizionali senza ricorrere ad un elevato consumo di energia termica con risvolti significativi dal punto di vista energetico, ambientale ed economico.

2.2.4 Economia circolare

L'economia circolare è l'evoluzione di quella lineare, cioè del “vecchio” modo di concepire la produzione che non teneva conto della sostenibilità. Con l'economia lineare si estraggono materie prime che vengono trasformate in un prodotto, il quale viene gettato via dopo l'uso. Tale approccio non è sostenibile nel lungo periodo, ed è per questo che il sistema nazionale sta attuando una serie di provvedimenti per passare a quella che viene definita economia circolare. Un concetto che mira ad una maggior sostenibilità ambientale attraverso l'allungamento della vita utile dei prodotti e a un riciclo che re-immetta in produzione le materie prime seconde, ricavate da scarti e rifiuti del primo ciclo produttivo.

L'economia circolare è un modello dalle enormi potenzialità, in grado di generare competitività coniugando insieme innovazione e sostenibilità. Per attuare questo modello è però necessario cambiare l'approccio tradizionale al mercato, ai clienti, alle risorse naturali. Questo permette alle aziende di acquisire notevoli vantaggi competitivi: riduzione dei costi, utilizzo efficiente dell'energia, diminuzione delle emissioni di CO₂, ottimizzazione e sicurezza della catena di fornitura.

Con l'economia circolare si introducono nuovi termini nel canonico vocabolario del modello di produzione e consumo: condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo. Così facendo si estende il ciclo di vita dei prodotti, minimizzando la produzione di rifiuti. L'innovazione tecnologica, la sostenibilità ambientale, l'efficienza energetica e l'utilizzo delle fonti rinnovabili viaggiando in simbiosi, conferiscono all'economia circolare tutte le caratteristiche di un nuovo sistema virtuoso.



Figura 2.10 – Schema economia circolare.

L'introduzione del concetto di circolarità delle risorse è importante, perché attualmente l'utilizzo delle materie prime in un'ottica di economia lineare è inefficiente e dispendioso. Ad esempio, solo il 15% circa delle materie plastiche europee viene riciclato e la Cina consuma più alluminio, acciaio e cemento di tutto l'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico). L'adozione di un approccio circolare offre sicuramente una parte della soluzione, che seppur non definitiva rappresenta il principio di una maggior sostenibilità delle imprese.

I sistemi di economia circolare e lineare, infatti, differiscono l'uno dall'altro nel modo in cui il valore viene creato o mantenuto. L'economia lineare segue tradizionalmente il percorso “prendi-produci-smaltisci”, ciò significa che le materie prime vengono estratte o raccolte, quindi, trasformate in prodotti che vengono utilizzati fino a quando non vengono buttati come rifiuti. In questo sistema economico, il valore viene creato producendo e vendendo quanti più prodotti possibile.

Un'economia circolare, invece, segue l'approccio delle 3R:

- ridurre;
- riutilizzare;
- riciclare.

L'uso delle materie prime è ridotto al minimo, mentre il riutilizzo di prodotti o di loro parti è massimizzato. Ultimo, ma non meno importante, le materie prime vengono riciclate secondo standard molto elevati.

L'economia circolare sta guadagnando una crescente attenzione fra imprenditori, produttori e leader di governo, fondamentalmente perché le opportunità offerte da questo approccio sono molteplici, fra cui si possono riscontrare:

- crescita economica;
- produzione cost-saving;
- maggior innovazione.

I potenziali benefici del passaggio a un modello circolare si estendono al concetto di sostenibilità e alla salvaguardia dell'ambiente. Questa pratica offre alle organizzazioni grandi e piccole un percorso per ridurre i costi di produzione, utilizzando meno materie prime e soddisfacendo al contempo le richieste dei clienti in nuovi modi. Progettando una riduzione dei rifiuti, mantenendo in uso i prodotti più a lungo e rigenerando i materiali si possono raggiungere gli obiettivi climatici globali.

Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all'interno del ciclo produttivo generando ulteriore valore.

2.2.5 L'inquinamento dei rifiuti di plastica

L'inquinamento da plastica è una vera piaga sociale dei nostri tempi. Si tratta di uno dei materiali più usati nel mondo e anche in Italia la maggior parte delle confezioni e degli imballaggi è realizzato con questo materiale. I polimeri più comunemente usati per la produzione di imballaggi sono:

- Polietilene (PE).
- Polietilentereftalato (PET).
- Polivinilcloruro (PVC).
- Polipropilene (PP).
- Polistirene (PS).

La resistenza, la flessibilità e la leggerezza delle plastiche tradizionali derivate dal petrolio le rendono i materiali ideali per un gran numero di applicazioni e la produzione è davvero massiccia e purtroppo non tutti fanno la raccolta differenziata correttamente. Il risultato dei comportamenti poco virtuosi in questo senso è l'inquinamento da plastica.

Il problema è ancora più accentuato nei paesi del mondo, come l'Asia e l'Africa, dove i sistemi di raccolta dei rifiuti sono poco efficienti o addirittura inesistenti. Il risultato, però, è sempre lo stesso: tanta plastica sulla terraferma ma soprattutto nel mare. Le conseguenze possono essere disastrose e coinvolgono le catene alimentari fino ad arrivare all'uomo. Sono state trovate microplastiche persino nell'Artico, a dimostrazione del fatto che non è un fenomeno circoscritto ma riguarda tutto il pianeta.

Diventa quindi estremamente importante porre attenzione al problema, a partire dalle scelte di tutti i giorni, preferendo materiali ecosostenibili, plastiche riciclate e conferendo i rifiuti in modo corretto. A livello industriale sono tante le realtà che si stanno convertendo a una produzione più sostenibile, ma la strada da fare è ancora lunga, perché il problema persiste.

Nonostante la gravità di questo problema la produzione globale di plastica continua e sta portando a crescenti minacce per il pianeta. La nostra vita quotidiana difficilmente può fare a meno di questo materiale: dagli imballaggi alimentari agli articoli da toeletta, ai vestiti, ai mobili, ai computer e alle automobili, la plastica è praticamente ovunque e la sua durata la rende difficile da biodegradare. A seconda del tipo, alcune materie plastiche possono impiegare decenni o addirittura milioni di anni per decomporsi in discarica. Pertanto, a meno che non venga incenerito (che a sua volta causa inquinamento), praticamente tutte le plastiche che abbiamo prodotto finora esistono ancora nel mondo e una volta che entrano nell'oceano, il loro impatto durerà per centinaia di anni.

Il mondo produce più di 300 milioni di tonnellate di rifiuti di plastica ogni anno, e questo numero è ancora in crescita senza considerare che la maggior parte (circa il 65% del totale), finisce in discarica. I materiali scartati che non si degradano si accumulano inevitabilmente comportando una grande occupazione di suolo che necessariamente viene reso impermeabile con una conseguente perdita di fertilità. I rifiuti di plastica presenti in queste discariche portano la produzione di composti tossici sia sotto forma di gas che di percolato, che non vanno bene per l'ambiente.

Un altro metodo comune utilizzato per smaltire i rifiuti di plastica è l'incenerimento. Il 25% dei rifiuti di plastica viene bruciato e ciò porta alla produzione di gas tossici che vengono rilasciati nell'ambiente. Questi gas tossici causano varie malattie agli abitanti delle località vicine a questi siti di incenerimento.

Sia la discarica che l'incenerimento sono metodi non rispettosi dell'ambiente e quindi ci spingono a pensare a tecniche alternative, e per questo il riciclaggio dei rifiuti di plastica sembra essere la migliore alternativa. Solo il 9% di questi viene attualmente riciclato. La ragione di ciò è che metà della plastica che produciamo è plastica usa-e-getta, vale a dire, sono tutti prodotti di plastica come cannucce, sacchetti di plastica e bottiglie d'acqua che vengono gettati via dopo che sono stati usati. Le plastiche usa-e-getta sono facili da produrre e scartare e proprio per questo portano al continuo aumento della quantità di rifiuti che entrano in discarica e che inevitabilmente inquinano l'ambiente. Anche gli oceani, vasti e profondi, sono come dei serbatoi di contenimento di sostanze inquinanti, che raccolgono materiale tossico da tutto il mondo. Oltre al carico sganciato dalle navi, anche le reti da pesca in plastica e le lenze con palangari (detti "attrezzi da pesca fantasma") sono una delle principali fonti di rifiuti di plastica nell'oceano, rappresentando circa il 10% degli stessi. Inoltre, il polistirolo espanso utilizzato in acquacoltura per realizzare gabbie è anche un'altra grande fonte di inquinamento marino da plastica.

Per risolvere il problema dell' inquinamento da plastica si può agire in diversi modi: bisogna lavorare per realizzare un' economia circolare di questo materiale basata cioè sulla riduzione dei consumi, sul riutilizzo degli oggetti in plastica, sulla ricerca di prodotti realizzati con materiali alternativi che hanno un minore impatto sull'uomo e sull'ambiente, sul miglioramento della gestione dei rifiuti puntando all'ottimizzazione della raccolta, sull'incremento del riciclo e sull'ampliamento del mercato delle materie secondarie.

Nel G20 di luglio 2020 è stato messo nero su bianco l'impegno a raddoppiare la circolarità dei materiali al 2030, cioè il riciclo dei rifiuti e l'utilizzo di materiali riciclati. I 20 grandi Paesi del G20 si impegnano al pieno utilizzo delle soluzioni basate sulla natura o sull'ecosistema per affrontare la perdita di biodiversità, ripristinare i terreni degradati, prevenire, mitigare e adattarsi ai cambiamenti climatici.

2.3 Utilizzo dei rifiuti plastici nel conglomerato bituminoso

La quantità di plastica nei rifiuti solidi urbani (RSU) è in aumento soprattutto a causa dei cambiamenti nello stile di vita degli ultimi decenni e lo smaltimento di questi prodotti è diventato un problema serio. Allo stesso tempo, un continuo aumento del numero di veicoli mette in mostra la necessità di disporre di strade di migliore qualità e progettazione ingegneristica. Per ridurre concretamente l'impatto che questi rifiuti hanno sull'ambiente, questi ultimi possono essere utilizzati per sostituire parzialmente il materiale convenzionale, come il bitume, per raggiungere le caratteristiche meccaniche desiderate realizzando un particolare impasto per il conglomerato bituminoso stradale.

L'uso di materiali di scarto come la plastica sia del settore domestico che industriale, nella costruzione di strade, è sempre più in crescita e l'idea di costruire strade con la plastica riciclata, ha preso sempre più piede negli ultimi anni e in tutto il mondo sono stati svolti studi sulle prestazioni dei conglomerati bituminosi contenenti questi materiali di recupero.

Diverse sperimentazioni hanno dimostrato come questo metodo sia efficace in quanto le strade risultano avere comunque buone proprietà, in alcuni casi anche migliorate rispetto a quelle realizzate con metodi tradizionali.

Inoltre, l'utilizzo di polimeri contribuisce a ridurre la quantità equivalente di bitume, riducendo così i costi di posa della strada.

Si evidenzia, però, che nonostante gli indiscutibili avanzamenti in questo settore, le iniziative future richiedono un ulteriore passo avanti nella cooperazione multidisciplinare tra governi e industria, ingegneri dei trasporti e specialisti dell'ambiente.

Lo studio di valide tecniche mirate a reinserire i rifiuti nel ciclo produttivo delle pavimentazioni stradali, al fine di sfruttare materiali non vergini e preservare le risorse naturali, rappresenta uno degli scopi della presente sperimentazione.

I rifiuti plastici in maggior parte presenti sul pianeta sono quelli utilizzati principalmente per l'imballaggio e sono costituiti principalmente da Polietilene, Polipropilene e polistirene. Il loro punto di rammollimento varia tra 110°C e 140°C e non producono gas tossici durante il riscaldamento, ma la plastica ammorbidita tende a formare una struttura simile a un film che riveste l'aggregato e riempie gli spazi tra di essi, quando viene miscelato a caldo a 170°C. Gli aggregati rivestiti in plastica vengono miscelati con bitume caldo di diverso tipo e le miscele possono essere utilizzate per la costruzione di strade. Le miscele di bitume confezionate in questa maniera hanno mostrato una migliore proprietà legante e in alcuni casi prestazioni migliori. Questo processo di produzione è anche ecologico ed economico.

In questo studio, viene effettuata una valutazione concerne l'utilizzo di rifiuti di plastica da RSU in chips compattate (0,5%, 1%, 2%, 3%, in peso rispetto al bitume) in un conglomerato bituminoso, analizzandone la capacità di sostituire il legante tradizionale e di migliorarne le prestazioni in modo da poterlo utilizzare per la costruzione della pavimentazione stradale.

3 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Al fine di individuare le effettive possibilità di impiego di plastica proveniente da Rifiuti Solidi Urbani nella tecnica delle costruzioni stradali e, principalmente, nei conglomerati bituminosi, il presente lavoro ha inteso affrontare un'indagine sperimentale mirata alla ricerca di miscele bituminose confezionate con aggiunta di questi materiali di recupero, analizzandone le caratteristiche volumetriche, meccaniche e tecnico-prestazionali rispetto a quelle tradizionali.

I provini sono stati confezionati aggiungendo un prestabilito quantitativo di plastica con differenti percentuali all'aggregato lapideo e nelle quantità di 1% e 3% ed i risultati sono stati comparati tra loro, in modo da valutare l'effetto generato dalla presenza delle plastiche.

Mediante analisi e prove di laboratorio, si è quindi indagato sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del conglomerato bituminoso, di tipo tradizionale ed innovativo (con aggiunta di plastica).

La miscela bituminosa esaminata, destinata agli strati delle pavimentazioni stradali di tipo flessibile, è stata confezionata tenendo conto di una distribuzione granulometrica media rispetto ad un fuso di prescrizione standard e generalmente utilizzato come quello previsto nei capitolati ANAS.

Gli impasti prodotti con le aggiunte delle plastiche saranno posti a confronto con un conglomerato dello stesso tipo senza plastiche seguendo il programma operativo concordato con l'ANAS, in termini di:

- Curva di addensamento con pressa giratoria (UNI EN 12697-10): per ciascuna miscela saranno compattati 3 provini a 180 giri (corrispondente, secondo il Capitolato Speciale d'Appalto ANAS, al livello di compattazione N3 per conglomerati bituminosi per strato di binder), applicando una pressione verticale di 600 kPa, una velocità di rotazione di 30 giri/minuto ed un angolo di inclinazione della fustella di 1,25°;
- Analisi volumetrica (vuoti residui) (UNI EN 12697-8): il contenuto di vuoti, vuoti nella miscela di aggregato e vuoti riempiti di bitume saranno determinati sui 3 provini compattati con pressa giratoria di cui al punto precedente, con particolare riferimento ai livelli di compattazione N1, N2 ed N3 previsti dal Capitolato Speciale d'Appalto ANAS. La massa volumica apparente dei provini sarà determinata secondo la norma UNI EN 12697-6: Procedura C – Provino sigillato);
- Resistenza a Trazione indiretta (UNI EN 12697-23): la prova verrà effettuata alla temperatura di 25 °C su 4 provini cilindrici compattati con pressa giratoria a 100 giri, applicando una velocità di deformazione verticale costante pari a 50 mm/min;
- Modulo di Rigidezza a Trazione indiretta (UNI EN 12697-26 – Annex C): la prova verrà effettuata alla temperatura di 20 °C su almeno 4 provini cilindrici compattati con pressa giratoria a 100 giri, applicando impulsi di carico con tempo di incremento di 124 ms;
- Resistenza a cicli di carico ripetuti (prova di fatica secondo la UNI EN 12697-24 – Annex E): le prove di fatica saranno effettuate in configurazione di trazione indiretta su provini cilindri confezionati con pressa giratoria a 100 giri, applicando impulsi di carico della durata di 0,1 s intervallati a periodi di riposo di 0,4 s.

3.1 Materiali

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso sono: aggregati vergini, bitume (70/100) e plastiche da RSU.

3.1.1 Aggregati

Gli aggregati sono materiali granulari di origine minerale utilizzati nelle costruzioni e rappresentano la fase solida dei conglomerati. Possono essere di tre tipologie:

- naturali: lapidei, di origine minerale, sottoposti a lavorazione meccanica. Derivano quindi da una roccia e al più subiscono un processo di frantumazione artificiale per essere ridotti alle dimensioni volute ed una successiva vagliatura;
- artificiali: di origine minerale, derivanti da un processo industriale che implica una modificazione termica o di altro tipo (termomeccanica, chimica). Sono i sottoprodotti delle lavorazioni industriali (le scorie di acciaieria, ceneri di carbone);
- riciclati: risultano dalle lavorazioni di materiale inorganico già usato nelle costruzioni, proveniente da processi di recupero per esempio derivante da demolizione di edifici o dalla scomposizione di pavimentazioni esistenti (conglomerato bituminoso fresato).

L'attuale normativa non fa distinzione tra i diversi tipi di aggregato: ciò significa che dal punto di vista della classificazione questi materiali sono da considerarsi identici, mentre dal punto di vista dell'impiego si tratta di valutarne le caratteristiche fisico-meccaniche per stabilire se siano realmente equivalenti.

Gli aggregati possono essere equiparati sulla base di queste caratteristiche, ma la condizione che ne determina la possibilità d'impiego è che i parametri che misurano le proprietà chimiche e tossicologiche dei materiali (soprattutto nel caso di quelli artificiali e riciclati) rientrino in certi intervalli. Infatti, poiché gli aggregati artificiali e di riciclo sono residui di altre lavorazioni, non sempre è nota l'origine di questi (o più semplicemente si ritiene siano presenti inquinanti) ed è necessario che gli aggregati vengano valutati anche dal punto di vista chimico e tossicologico. In realtà il fatto di fissare l'attenzione sugli aggregati artificiali e riciclati non sarebbe del tutto giustificato perché esistono aggregati naturali che, a causa del luogo di provenienza, sono più inquinati rispetto agli aggregati artificiali e riciclati.

Per la classificazione degli aggregati deve essere eseguita l'analisi granulometrica che consiste nel definire la distribuzione percentuale delle dimensioni dei grani. L'analisi granulometrica si fa per vagliatura (crivelli o setacci) oppure mediante sedimentazione quando si è in presenza di materiale fine.

Convenzionalmente il materiale, oltre che attraverso una curva granulometrica, viene caratterizzato attraverso delle pezzature, di solito indicate nel seguente modo: d/D , d dimensione minore, D dimensione maggiore. All'interno di ogni pezzatura il materiale sarà variamente distribuito e avrà una propria curva granulometrica.

Gli inerti, oltre che per la loro origine, si classificano anche in base alle loro dimensioni.

Secondo la CNR 139/92 utilizzata nel settore stradale i granuli assumono la seguente denominazione:

DIMENSIONI	DENOMINAZIONE
25-71 mm	pietrisco
10-25 mm	pietrischetto
2-10 mm	graniglia
0,075-4 mm	sabbione
0,075-2 mm	sabbia
< 0,075 mm	filler

Tabella 3.1 –Classificazione degli aggregati secondo CNR 139/92

Sugli aggregati si possono fare una serie di prove volte ad accertarne le proprietà fisiche.

Le prove in questione riguardano:

- la determinazione del peso di volume (densità, peso specifico apparente, massa specifica apparente) ossia il rapporto tra il peso di una quantità di materiale e il suo volume;
- il peso specifico (reale, massa volumica reale) che è il rapporto tra il peso di una quantità di materiale riferita alla matrice solida e il suo volume, escludendo cioè i vuoti e l'acqua eventualmente presenti;
- la porosità, ossia il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale;
- l'indice dei vuoti che è il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume della matrice solida;
- la permeabilità, cioè l'attitudine del materiale a lasciarsi attraversare dall'acqua;
- l'umidità quindi il contenuto d'acqua, dato dal rapporto tra il peso dell'acqua presente e il peso della matrice solida;
- la suscettività all'acqua, quindi i Limiti di Atterberg.

Nel caso dei materiali tradizionali si fa riferimento all'aggregato lapideo naturale che può essere un materiale di frantumazione (frutto di una serie di trattamenti che sono eseguiti in impianto dove il materiale lapideo viene frantumato, selezionato e vagliato), o un materiale di origine alluvionale.

Normalmente per un impiego nelle costruzioni stradali si tende a preferire l'aggregato di frantumazione poiché, a differenza dell'inerte alluvionale più arrotondato, si presenta spigoloso e di conseguenza è in grado di conferire alla miscela un maggior attrito interno, una maggior resistenza e migliori proprietà meccaniche. Tuttavia, per ottenerlo sono necessari dei processi industriali costosi, perciò per limitare i costi è possibile utilizzare inerte non frantumato per impieghi meno nobili.

L'aggregato lapideo può provenire da rocce ignee, sedimentarie o metamorfiche. Vengono di seguito descritte le origini dei principali tipi di rocce impiegati nel campo stradale. Le rocce ignee/magmatiche si dividono in effusive (porfidi, trachiti, porfiriti, basalti, tufi, pomici) e intrusive (graniti, sieniti, dioriti, gabbri, peridotiti). Le rocce ignee sono idonee all'uso in relazione alle loro caratteristiche di resistenza e di durezza e alla presenza di silice. La presenza della silice può compromettere ad esempio l'impiego di questi materiali nell'ambito delle miscele bituminose poiché non sussiste compatibilità tra questo materiale e il bitume e ciò provoca problemi di adesione. Tuttavia, alcune di queste rocce sono particolarmente

ricercate perché hanno delle caratteristiche di resistenza e di durezza che le rendono idonee ad un impiego negli strati superiori che sono maggiormente e direttamente sollecitati dal traffico. Tra questi, i porfidi e i basalti sono considerati le due tipologie di aggregato preferibili per gli strati di usura. Le rocce intrusive hanno un impiego non molto frequente nel settore stradale; sono dotate di una struttura microcristallina e non godono di grandi proprietà fisico-meccaniche. A queste si preferiscono le rocce effusive, alcune delle quali come trachiti e porfiriti si adoperano anche nella realizzazione delle pavimentazioni a elementi. Tuttavia, tra le rocce effusive vi sono anche i tufi e i pomici che hanno delle proprietà estremamente scadenti e pertanto non vengono impiegati. Le rocce sedimentarie (calcari, dolomie, marne, breccie, selci, arenarie, argille) rappresentano una categoria di rocce che si trovano con grande frequenza in natura. Tra queste, i calcari sono i principali componenti delle pavimentazioni: sono caratterizzati da proprietà medie e sono utilizzati negli strati che vanno dallo strato di fondazione fino allo strato di usura. Tuttavia, si usano nello strato di usura solo quando non agiscono sollecitazioni particolarmente intense da parte del traffico. Infatti, nelle applicazioni più importanti, come quelle autostradali, ci si orienta verso aggregati con proprietà migliori quali porfidi e basalti o anche verso aggregati di tipo artificiale come scorie di acciaieria. In alternativa ai calcari vi sono anche le dolomie, ma mentre gli uni sono dotati di ossido di calcio, negli altri vi è magnesio che crea dei problemi a contatto con alcuni leganti; inoltre, le dolomie sono meno resistenti dei calcari. Nella classe delle rocce sedimentarie sono comprese poi le marne, le breccie, le selci, le arenarie e le argille, tuttavia di utilizzo limitato nel settore stradale.

Le rocce metamorfiche sono divise in due classi: le rocce scistose e le rocce non scistose. Le rocce scistose per le loro caratteristiche non sono ricercate nel settore stradale. Le rocce non scistose hanno delle proprietà meccaniche abbastanza buone e in diverse situazioni possono trovare impiego. Le rocce vengono quindi trattate negli impianti e diventano aggregati.

Il riferimento per la loro classificazione è dato dalla CNR 139/92 che li divide in pietrischi, pietrischetti, graniglie, sabbie e filler. Degli aggregati lapidei è importante conoscere certe proprietà:

- la granulometria;
- la forma: è evidente che l'aggregato adoperato in una miscela stradale deve essere il più possibile compatto e poliedrico e non allungato o appiattito poiché in questo caso sotto carico tenderebbe a rompersi;
- la spigolosità o angolarità dei grani: tale caratteristica conferisce resistenza alla miscela e, se presente sulla superficie carrabile, dà anche aderenza;
- la pulizia: l'inerte deve essere pulito, privo di sostanze organiche e di materiale fine che potrebbero impedire l'adesione del bitume all'inerte stesso o compromettere la presa o l'indurimento (nel caso di miscele cementizie);
- la resistenza alla frantumazione o alla frammentazione: sotto carico il materiale non deve rompersi; deve anche resistere all'abrasione e allo schiacciamento;
- la resistenza al consumo per attrito: questo riguarda soprattutto gli inerti adoperati nello strato di usura sul quale agisce direttamente il traffico;
- la resistenza alla levigatezza o abradibilità;
- la gelività e l'alterabilità: in genere si deve fare in modo che gli inerti non abbiano delle microfessure, che non siano porosi, perché queste sono situazioni che agevolano la formazione di rotture in presenza di basse temperature e sotto traffico.

Le prove da compiere per caratterizzare gli inerti sono le seguenti:

- l'analisi granulometrica (UNI EN 933-1/2, CNR 23);
- l'indice di forma e di appiattimento (UNI EN 933-4/3, CNR 95);
- l'equivalente in sabbia (UNI EN 933-8, CNR 27);
- il coefficiente di frantumazione (CNR 4/53 poco usata);
- Los Angeles (UNI EN 1097-2, CNR 34);
- il coefficiente di qualità Deval (CNR 4/53 poco usata in campo stradale);
- il coefficiente di usura Micro-Deval (UNI EN 1097-1, CNR 109);
- il coefficiente di levigabilità accelerata CLA (UNI EN 1097-8, CNR 140);
- la sensibilità al gelo (CNR 80);
- il coefficiente di imbibizione (CNR 137);
- la perdita per decantazione (CNR 4/53 poco usata);
- l'idrofilia (CNR 4/53 poco usata);
- lo spogliamento (CNR 138);
- la porosità, l'indice dei vuoti;
- la massa volumica reale, apparente.

Gli aggregati lapidei costituiscono, all'interno della miscela di conglomerato bituminoso per uso stradale, lo scheletro portante solido della miscela stessa. Generalmente la loro presenza varia da un minimo di circa il 75% nel caso di conglomerati bituminosi drenanti, particolarmente "aperti", ad un massimo di circa 90% per stradi di pavimentazioni stradali tipici di usura. Gli aggregati lapidei per essere impiegati all'interno di pavimentazioni stradali devono rispettare alcune stringenti prescrizioni.

Una classificazione adeguata agli scopi dell'ingegneria stradale si basa su prove che valutano caratteristiche geometriche, fisico-meccaniche e chimiche degli aggregati, indipendentemente dalla loro natura.

Tutti gli aggregati devono essere identificati mediante il loro intervallo dimensionale significativo, espresso dal rapporto tra il diametro minimo (d) e il diametro massimo (D). Le analisi granulometriche devono essere effettuate in conformità alla norma UNI EN 933-1, mediante una delle serie di setacci indicati dalla norma UNI EN 13043.

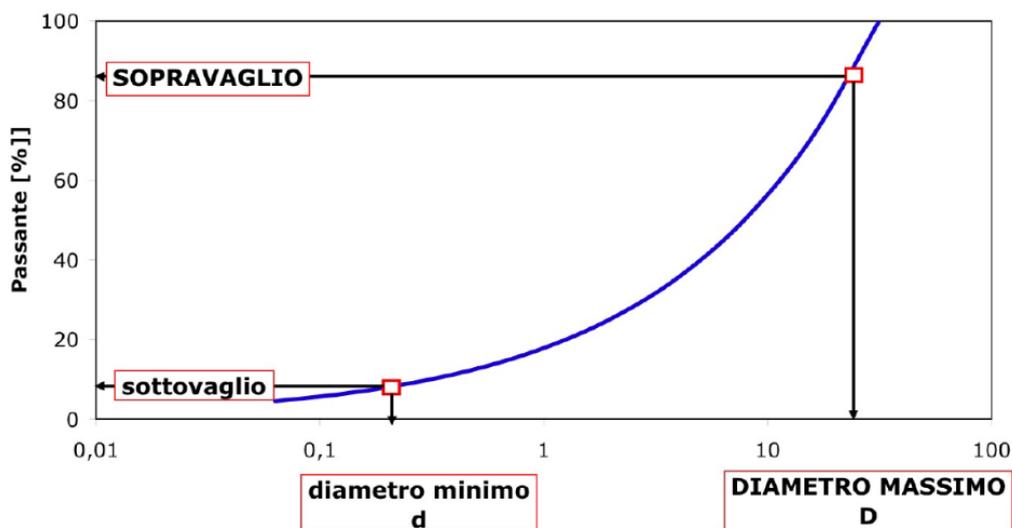


Figura 3.1-Curva granulometrica aggregati

L'esecuzione della prova di analisi granulometrica deve essere fatta secondo la norma UNI EN 933-1, e in funzione dei risultati ottenuti, si identifica la categoria alla quale appartiene l'aggregato esaminato in relazione alla tabella "Requisiti generali di granulometria" di seguito proposta.

Aggregato	Dimensione [mm]	Percentuale passante in massa					Categoria
		2 D	1,4 D	D	D	d/2	
Grosso	D > 2	100	100	Da 90 a 99	Da 0 a 10	Da 0 a 2	Gc 90/10
		100	Da 98 a 100	Da 90 a 99	Da 0 a 15	Da 0 a 5	Gc 90/14
		100	Da 98 a 100	Da 90 a 99	Da 0 a 20	Da 0 a 5	Gc 90/20
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	Da 0 a 15	Da 0 a 2	Gc 85/15
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	Da 0 a 20	Da 0 a 5	Gc 85/20
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	Da 0 a 35	Da 0 a 5	Gc 85/35
Fine	D ≤ 2	100	-	Da 85 a 99	-	-	Gf 85
Frazione unica	D ≤ 45 e d = 0	100	Da 98 a 100	Da 90 a 99	-	-	G _A 90
		100	Da 98 a 100	Da 85 a 99	-	-	G _A 90

Tabella 3.2 –Requisiti generali di granulometria

Oltre ai requisiti di dimensione, nella caratterizzazione di un aggregato per l'impiego in miscele di conglomerato bituminoso per uso stradale è importante valutare anche la forma dell'aggregato stesso. Tale caratteristica viene determinata mediante l'indice di appiattimento e l'indice di forma. Il primo viene indicato mediante la categoria FI (ad es. FI 30 indica un indice di appiattimento ≤ 30). La prova consiste nel suddividere il campione di prova mediante una normale setacciatura in frazioni granulometriche diverse, comprese fra i setacci "d" e "D", con $D \approx 1,25 d$ e nel setacciare il materiale di ciascuna frazione al vaglio avente un'apertura delle maglie uguale a $D/2$. Non sono ritenuti idonei i granuli della frazione granulometrica d/D che passano attraverso la griglia di apertura $D/2$ in quanto considerati troppo appiattiti. Analogamente, la prova per stabilire l'indice di forma (Norma UNI EN 933-4) indica il risultato con il parametro SI (per es. SI 30 indica che l'indice di forma è ≤ 30). Secondo tale norma, hanno forma idonea i granuli "poliedrici", per i quali il rapporto tra la massima e la minima dimensione risulti ≤ 3 (coefficiente di forma ≤ 3). La prova, eseguita su un provino costituito da una certa quantità di elementi lapidei, consiste nell'esaminare manualmente, mediante l'ausilio di un apposito calibro, ciascun elemento lapideo, individuando quali sono i granuli di forma non idonea, per i quali il coefficiente di forma (rapporto tra la massima e la minima dimensione) è ≥ 3, cioè tutti i granuli, con dimensione massima "L" che passano attraverso il calibro secondario, di spessore "S" = $L/3$. Dal punto di vista fisico-meccanico, risulta molto importante valutare alcuni parametri degli aggregati lapidei, che rappresentano indicatori delle performance dello scheletro litico nella miscela di conglomerato bituminoso. Un parametro caratterizzante le prestazioni meccaniche di un aggregato lapideo, è la resistenza alla frammentazione. Questa proprietà si valuta attraverso l'esecuzione della prova Los Angeles.

Tale resistenza viene stimata attraverso il coefficiente Los Angeles, indicato secondo la norma EN 1097-2, punto 5, con l'acronimo LA (es. LA 30 indica che il coefficiente Los Angeles è ≤ 30). La prova misura la perdita di percentuale in peso, per abrasione, di un aggregato lapideo sottoposto ad un'azione di rotolamento ed urto insieme con sfere metalliche, poste insieme

all'aggregato, in un apposito cilindro. La norma prevede inoltre, che la prova sia eseguita su una massa P1 di 5000 grammi di aggregato, considerando la quantità di materiale fino (< 1,6 mm) prodotto, al termine delle rotazioni del cilindro metallico, in presenza di 11 sfere metalliche di massa complessiva di 4840 grammi. La frazione di aggregato da esaminare è costituita un unico assortimento granulometrico (10-14 mm), con alcune precisazioni: la percentuale di passante ad un setaccio di 12,5 mm deve essere compresa tra il 60 ed il 70%, altresì la percentuale di passante al setaccio di 11,2 mm deve essere compresa tra il 30 ed il 40% della massa totale. Il coefficiente LA viene valutato attraverso una relazione il cui risultato è funzione unicamente della massa m trattenuta al setaccio da 1,6 mm, dopo le rotazioni, ed espressa in grammi:

$$LA = (5000 - m) / 50$$

Tra le altre caratteristiche meccaniche, che un buon aggregato lapideo per conglomerati bituminosi per uso stradale deve possedere, è necessario citare la resistenza all'usura per abrasione superficiale. Questa risulta essere una caratteristica molto importante dal punto di vista della sicurezza stradale in quanto, il corretto contatto e l'adesione tra pavimentazione stradale e pneumatico di un qualsiasi mezzo di trasporto, è garantito dalla scabrosità superficiale della pavimentazione stessa. Utilizzare aggregati lapidei che possano mantenere il più a lungo possibile questa caratteristica superficiale, consente di avere superfici viarie più sicure e durevoli.

Anche nell'ambito del programma SHRP (Strategic Highway Research Program) è stata riconosciuta la particolare importanza di alcuni parametri quali:

- la spigolosità dell'aggregato grosso e fine;
- l'appiattimento e l'allungamento dei grani;
- il contenuto di argilla;
- la granulometria.

E' proprio l'accentuata spigolosità degli elementi litici che fa aumentare l'attrito fra i grani e dunque la resistenza a taglio e all'ormaiamento; per questo motivo, in strati di usura e in pavimentazioni soggette ad elevati carichi, si richiede fino al 100% di materiale frantumato.

La presenza di grani piatti e allungati può risultare dannosa in fase di costruzione in quanto possono frantumarsi variando la granulometria. Tale comportamento è tanto più accentuato quanto più il materiale è tenero. Particelle appiattite possono inoltre disporsi parallelamente tra di loro creando piani preferenziali di scorrimento e riducendo la resistenza a taglio.

Oltre ai requisiti geometrici bisogna garantire pulizia e qualità dei fini: si verifica la presenza di minerali argillosi o organici che possono compromettere l'adesione con il bitume e quindi le prestazioni causando suscettibilità all'acqua.

Ci interessa, inoltre, individuare la presenza di minerali nocivi come sostanze solubili in acqua o sostanze che alterano i meccanismi di presa dei leganti idraulici.

Le proprietà chimiche di un aggregato, che dipendono dalla sua composizione (minerali componenti la roccia madre), influenzano in modo determinante l'adesione aggregato-bitume. Indipendentemente dall'origine degli aggregati, le norme tecniche di Capitolato Anas fanno riferimento a specifiche caratteristiche per giudicarne l'idoneità. Tali caratteristiche variano in funzione dello strato per cui il materiale deve essere impiegato.

Per quanto riguarda la granulometria, le caratteristiche degli aggregati generalmente richieste dai capitolati sono riportate nelle seguenti tab. 3.3, 3.4, 3.5:

AGGREGATO GROSSO					
Indicatori di qualità			Strato di pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Los Angeles (*)	UNI EN 1097-2	%	≤ 30	≤ 30	≤ 20
Micro Deval Umida (*)	UNI EN 1097-1	%	≤ 25	≤ 25	≤ 15
Quantità di frantumato	ENI EN 933-5	%	≥ 70	≥ 80	100
Dimensione max	UNI EN 933-1	mm	40	30	20
Sensibilità al gelo	UNI EN 1097-6	%	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Spogliamento	UNI EN 12697-11	%	≤ 5	≤ 5	0
Passante allo 0,075	UNI EN 933-1	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Indice di appiattimento	UNI EN 933-3	%		≤ 30	≤ 30
Porosità	UNI EN 1936	%		≤ 1,5	≤ 1,5
CLA	UNI EN 1097-8	%			≥ 40

(*) Uno dei due valori dei coefficienti Los Angeles e Micro Deval Umida può risultare maggiore (fino a due punti percentuali) rispetto al limite indicato, purché la loro somma risulti inferiore o uguale alla somma dei valori limite indicati.

Tabella 3.3 –Caratteristiche dell'aggregato grosso

AGGREGATO FINO					
Indicatori di qualità			Strato di pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Equivalente in sabbia	UNI EN 933-8	%	≥ 50	≥ 60	≥ 70
Indice di plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892	%	N.P.		
Limite liquido	UNI CEN ISO/TS 17982	%	≤ 25		
Passante allo 0,075	UNI EN 933-1	%		≤ 2	≤ 2
Quantità di frantumato	AASHTO T304-A	%		≥ 40	≥ 50

Tabella 3.4 – Caratteristiche dell'aggregato fino

Tra i materiali tradizionali si deve ricordare anche il filler che è la frazione di aggregato avente dimensioni minori di 0,075 mm secondo la norma CNR 139 (la normativa UNI EN 933-1 invece richiede l'utilizzo del setaccio da 0,063 mm). In realtà sono consentite tolleranze (100% passante al setaccio da 0,18 mm e l'80% passante al setaccio da 0,075 mm). Il filler può essere di tipo naturale (di tipo sabbioso, argilloso, di origine calcarea, dolomitica o da roccia asphaltica) o sintetico (cemento, calce idrata, polvere di asfalto, ceneri volanti) e di esso si devono controllare una serie di proprietà come:

- la granulometria, perché il filler deve avere una granulometria che risponda alla definizione sopra indicata;
- il coefficiente di attività che per lo più si misura o con l'equivalente in sabbia o con delle prove specifiche come il blu di metilene che servono a vedere quanto pericolosa possa essere la presenza di quel filler;
- i limiti di Atterberg;
- altre prove come lo spogliamento della roccia da cui il filler proviene;

- le prove dei vuoti Ridgen (UNI EN 1097-4, CNR 123) o del Potere rigidificante: il filler aggiunto ad un bitume ha la capacità di aumentarne la rigidità e ne altera le caratteristiche reologiche per cui può consentire, trasformando il bitume in mastice, degli impieghi che altrimenti non sarebbero possibili (per esempio il bitume diventa più rigido, ha una minore penetrazione).

Le caratteristiche del filler generalmente richieste dai capitolati sono riportate nella seguente tabella:

FILLER			
Indicatori di qualità			Strato di pavimentazione
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base - Binder - Usura
Spogliamento	UNI EN 12697-11	%	≤ 5
Passante allo 0,18	UNI EN 933-10	%	100
Passante allo 0,075	UNI EN 933-10	%	≥ 80
Indice Plasticità	UNI CEN ISO/TS 17892	%	N.P.
Vuoti Ridgen	UNI EN 1097-4	%	30-45
Stiffening Power (filler/bitume = 1,5)	UNI EN 13179-1	ΔPA	≥ 5

Tabella 3.5 – Caratteristiche del filler

Gli Aggregati sono soggetti al Construction Products Regulation (Regolamento n°305/2011 sui Prodotti da Costruzione) e per essere immessi sul mercato europeo devono essere conformi alle Norme europee armonizzate.

Per quanto concerne gli aggregati per conglomerati bituminosi essi devono rispondere ai requisiti della norma europea UNI EN 13043.

Tale norma fornisce lo schema per la determinazione e la dichiarazione delle proprietà (requisiti), per l'utilizzo finale; la conformità autorizza alla Marcatura CE del prodotto.

Tali elementi potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa purché, per ogni tipologia, risultino soddisfatti i requisiti indicati nelle tabelle 3.6, 3.7, 3.8, al variare del tipo di strada.

AUTOSTRADE ED EXTRAURBANE PRINCIPALI					
Trattenuto al crivello UNI n. 5					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Los Angeles (*)	CNR 34/73	%	≤ 25	≤ 25	≤ 20
Micro Deval umida (*)	CNR 109/85	%	≤ 20	≤ 20	≤ 15
Quantità di frantumato	-	%	≥ 90	≥ 90	100
Dimensione max	CNR 23/71	mm	40	30	20
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	%	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Spogliamento	CNR 138/92	%	≤ 5	≤ 5	0
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Indice appiattimento	CNR 95/84	%		≤ 25	≤ 20
Porosità	CNR 65/78	%		≤ 1,5	≤ 1,5
CLA	CNR 140/92	%			≥ 42

(*) Uno dei due valori dei coeff. Los Angeles e Micro Deval Umida può risultare maggiore (fino a due punti) rispetto al limite indicato, purché la loro somma risulti inferiore o uguale alla somma dei valori limite indicati.

Tabella 3.6-Caratteristiche dell'aggregato grosso per strade extraurbane principali

EXTRAURBANE SECONDARIE E URBANE DI SCORRIMENTO					
Trattenuto al crivello UNI n. 5					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Los Angeles (*)	CNR 34/73	%	≤ 30	≤ 30	≤ 20
Micro Deval Umida (*)	CNR 109/85	%	≤ 25	≤ 25	≤ 15
Quantità di frantumato	-	%	≥ 70	≥ 80	100
Dimensione max	CNR 23/71	mm	40	30	20
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	%	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Spogliamento	CNR 138/92	%	≤ 5	≤ 5	0
Passante allo 0.0075	CNR 75/80	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Indice appiattimento	CNR 95/84	%		≤ 30	≤ 30
Porosità	CNR 85/78	%		≤ 1,5	≤ 1,5
CLA	CNR 140/92	%			≥ 40

(*) Uno dei due valori dei coeff. Los Angeles e Micro Deval Umida può risultare maggiore (fino a due punti) rispetto al limite indicato, purché la loro somma risulti inferiore o uguale alla somma dei valori limite indicati.

Tabella 3.7- Caratteristiche dell'aggregato grosso per strade extraurbane secondarie e urbane di scorrimento

STRADE URBANE DI QUARTIERE E LOCALI					
Trattenuto al crivello UNI n. 5					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Los Angeles (*)	CNR 34/73	%	≤ 40	≤ 40	≤ 25
Micro Deval Umida (*)	CNR 109/85	%	≤ 35	≤ 35	≤ 20
Quantità di frantumato	-	%	≥ 60	≥ 70	100
Dimensione max	CNR 23/71	mm	40	30	20
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	%	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Spogliamento	CNR 138/92	%	≤ 5	≤ 5	0
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Indice appiattimento	CNR 95/84	%		≤ 35	≤ 30
Porosità	CNR 85/78	%		≤ 1,5	≤ 1,5
CLA	CNR 140/92	%			≥ 40

(*) Uno dei due valori dei coeff. Los Angeles e Micro Deval Umida può risultare maggiore (fino a due punti) rispetto al limite indicato, purché la loro somma risulti inferiore o uguale alla somma dei valori limite indicati.

Tabella 3.8- Caratteristiche dell'aggregato grosso per strade urbane di quartiere e locali

Gli aggregati fini per conglomerati bituminosi a caldo tradizionali devono possedere le caratteristiche riassunte nelle tabelle 3.9, 3.10, 3.11, al variare del tipo di strada.

AUTOSTRADE ED EXTRAURBANE PRINCIPALI					
Passante al crivello UNI n. 5					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Equivalente in sabbia	CNR 27/72	%	≥ 50	≥ 60	≥ 80
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.		
Limite liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25		
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%		≤ 2	≤ 2
Quantità di frantumato	CNR 109/85	%		≥ 50	≥ 70

Tabella 3.9- Caratteristiche dell'aggregato fino per strade extraurbane principali

EXTRAURBANE SECONDARIE E URBANE DI SCORRIMENTO					
Passante al crivello UNI n. 5					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Equivalente in Sabbia	CNR 27/72	%	≥ 50	≥ 60	≥ 70
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.		
Limite Liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25		
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%		≤ 2	≤ 2
Quantità di frantumato	CNR 109/85	%		≥ 40	≥ 50

Tabella 3.10 – Caratteristiche dell'aggregato fino per strade extraurbane secondarie e urbane di scorrimento

STRADE URBANE DI QUARTIERE E LOCALI					
Passante al crivello UNI n. 5					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Equivalente in Sabbia	CNR 27/72	%	≥ 40	≥ 50	≥ 60
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.		
Limite Liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25		
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%		≤ 3	≤ 3
Quantità di frantumato	CNR 109/85	%		≥ 40	≥ 50

Tabella 3.11 – Caratteristiche dell'aggregato fino per strade urbane di quartiere e locali

In ogni caso il filler per conglomerati bituminosi a caldo tradizionali deve soddisfare i requisiti indicati in Tabella 3.12.

TUTTE LE STRADE					
Filler					
Indicatori di qualità			Strato pavimentazione		
Parametro	Normativa	Unità di misura	Base	Binder	Usura
Spogliamento	CNR 138/82	%		≤ 5	
Passante allo 0.18	CNR 23/71	%		100	
Passante allo 0.075	CNR 75/80	%		≥ 80	
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014			N.P.	
Vuoti Rigden	CNR 123/88	%		30-45	
Stiffening Power Rapporto filler/bitume = 1,5	CNR 122/88	ΔPA		≥ 5	

Tabella 3.12 – Caratteristiche del filler

Gli aggregati utilizzati nella presente sperimentazione sono descritti nei seguenti paragrafi.

3.1.1.1 Sabbia 0/6

La sabbia è una roccia sedimentaria sciolta, proveniente dall'erosione di altre rocce la cui composizione dipende dalle condizioni di formazione (chimica, organica o clastica). Le cave per l'estrazione della sabbia si trovano prevalentemente lungo i corsi d'acqua o laghi e, di conseguenza, si trovano distribuite più o meno in tutte le regioni italiane.

La sabbia utilizzata per la realizzazione di questa indagine sperimentale è di natura calcarea con pezzatura 0/6, proveniente da una cava in provincia di Ancona e con un peso specifico pari a 2700 kg/m³.

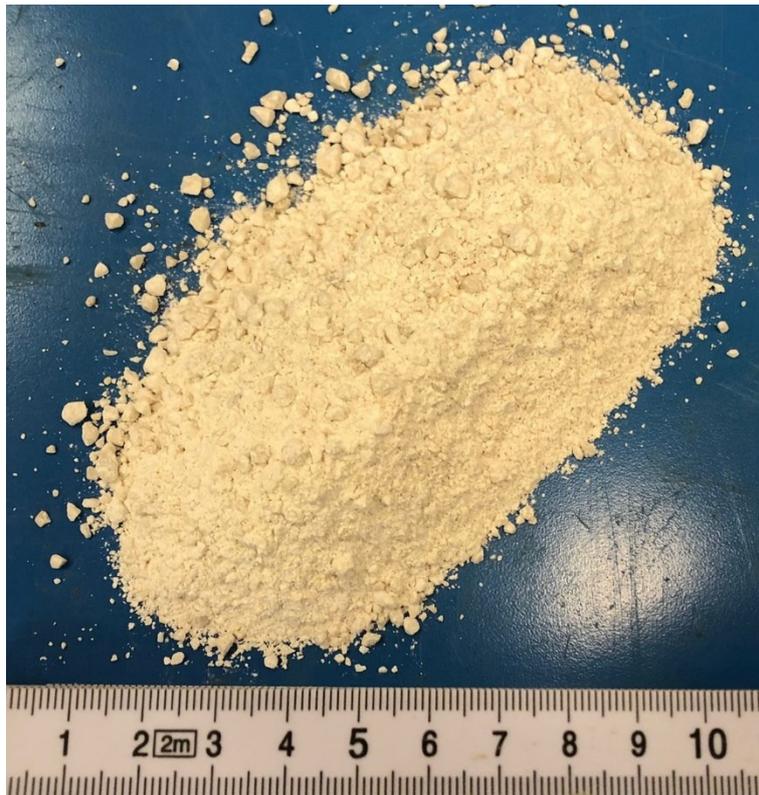


Figura 3.2- Sabbia 0/6

Setaccio/crivello (mm)	Passante (%)
31,5	100
20	100
16	100
12,5	100
8	100
4	97,4
2	72,5
1	44,7
0,5	28,5
0,25	21,5
0,125	15,1
0,063	10,4

Tabella 3.13 – Granulometria Sabbia 0/6

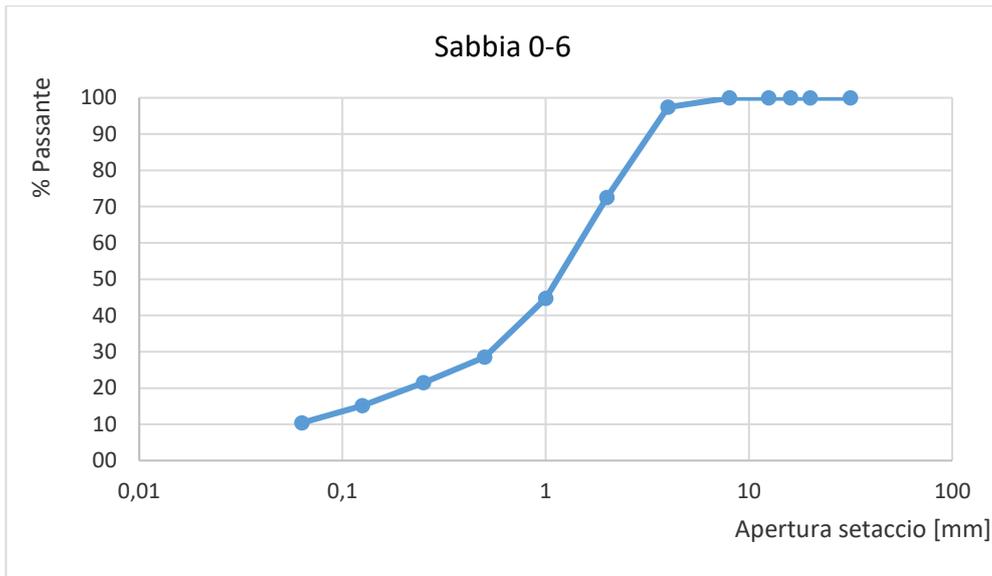


Figura 3.3- Granulometria Sabbia 0/6

3.1.1.2 Graniglia 4/8

La graniglia 4-8 mm è il prodotto selezionato della frantumazione di inerti alluvionali prevalentemente calcarei.

Le principali caratteristiche tecniche sono così riassumibili:

- natura mineralogica calco-silicea, prevalentemente calcarea;
- elementi poliedrici a spigoli vivi, non allungati e non lenticolari, assenza di fini.



Figura 3.4- Graniglia 4/8

In seguito, è riportata l'analisi e la curva granulometrica.

Setaccio/crivello (mm)	Passante (%)
31,5	100
20	100
16	100
12,5	100
8	100
4	23
2	4
1	1,8
0,5	1,8
0,25	1,8
0,125	1,8
0,063	1,8

Tabella 3.14- Granulometria Graniglia 4/8

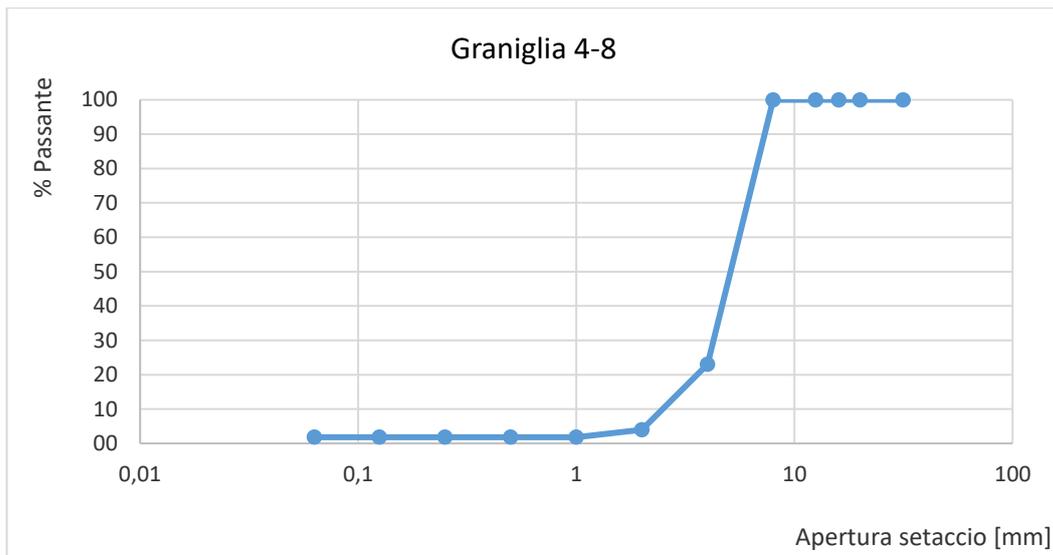


Figura 3.5 - Granulometria Graniglia 4/8

3.1.1.3 Pietrisco 8/12

Il pietrisco 8-12 mm è il prodotto selezionato dalla frantumazione di inerti alluvionali prevalentemente calcarei.

Le principali caratteristiche tecniche sono così riassumibili:

- natura mineralogica calco-silicea, prevalentemente calcarea;
- elementi poliedrici a spigoli vivi, non allungati e non lenticolari;



Figura 3.6-Pietrisco 8/12

In seguito, è riportata l'analisi e la curva granulometrica.

Setaccio/crivello (mm)	Passante (%)
31,5	100
20	100
16	100
12,5	100
8	28,4
4	1,1
2	1,1
1	1,1
0,5	1,1
0,25	1,1
0,125	1,1
0,063	1,1

Tabella 3.15- Granulometria Pietrisco 8/12

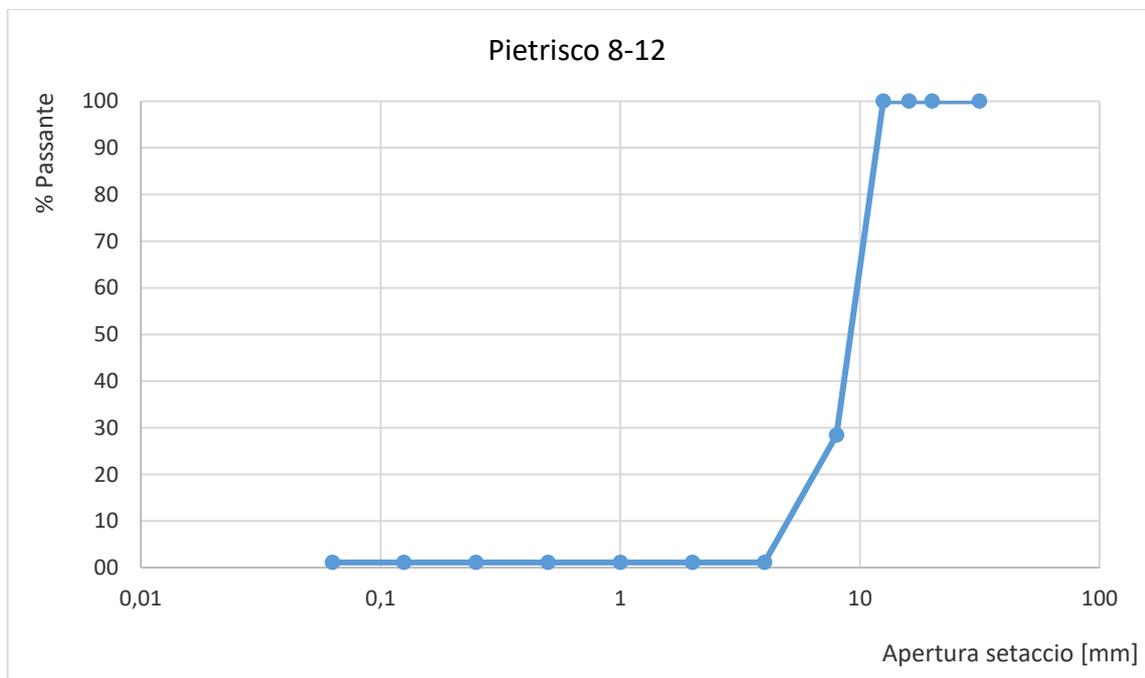


Figura 3.7- Granulometria Pietrisco 8/12

3.1.1.4 Pietrisco 12/25



Figura 3.8- Pietrisco 12/25

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

Setaccio/crivello (mm)	Passante (%)
31,5	100
20	95
16	67,6
12,5	26,2
8	1,9
4	1,1
2	0,7
1	0,7
0,5	0,7
0,25	0,7
0,125	0,7
0,063	0,7

Tabella 3.16- Granulometria Pietrisco 12/25

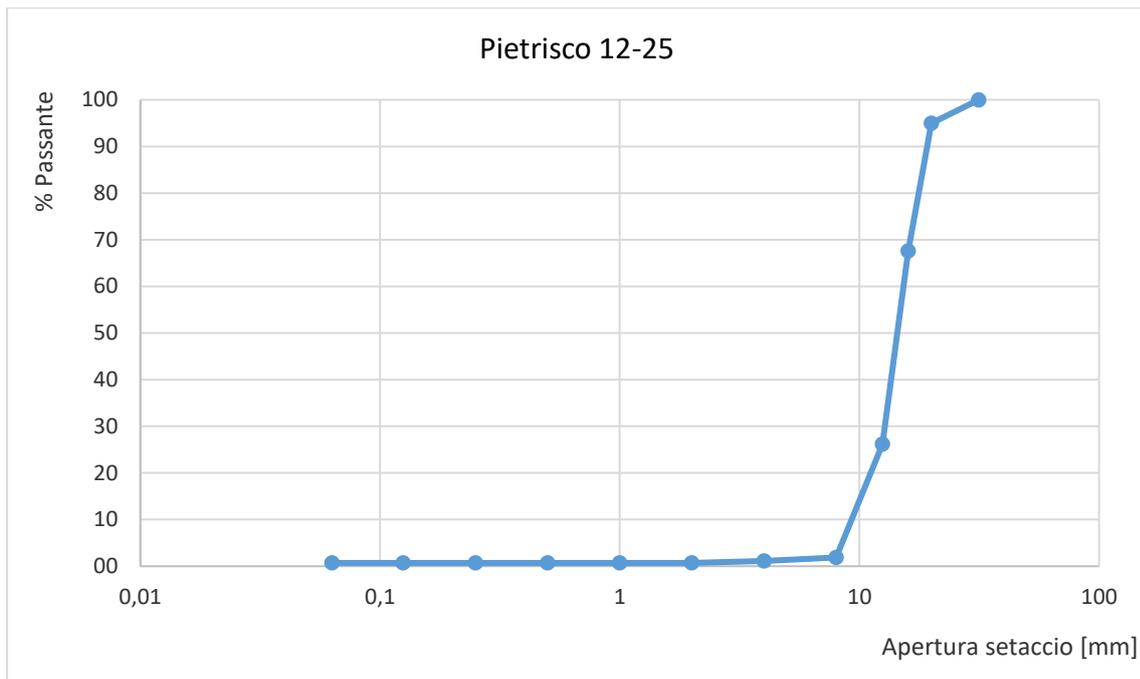


Figura 3.9- Granulometria Pietrisco 12/25

3.1.1.5 Filler

Dall'inglese "to fill" (riempire), con il termine filler viene indicato l'aggregato di dimensioni ridottissime ($< 0,063$ mm) che ha la funzione di riempitivo poiché le ridotte dimensioni permettono di diminuire la percentuale di vuoti di un conglomerato artificiale. Viene utilizzato in diversi campi dell'ingegneria civile e in special modo per il confezionamento di, malte, conglomerati cementizi e bituminosi.

Il filler è particolarmente importante per i conglomerati bituminosi, ed è quindi fondamentale controllarne il dosaggio e la composizione. Esso risulta essenziale poiché garantisce attraverso la sua presenza la formazione del mastice, cioè il prodotto ottenuto dalla unione di filler e bitume, il quale assicura molteplici proprietà delle miscele come la capacità di evitare fenomeni di trasudamento, di prevenire lo spogliamento e di migliorare la stabilità delle miscele.

Nella normativa UNI EN 933-1, il filler è il passante al setaccio da 0,063 mm, anche se è comunque consentita una tolleranza del 20% di trattenuto al setaccio da 0,075 mm.

Il contenuto di P 0,063 negli aggregati grossi e fini deve quindi essere controllato e dichiarato:

Aggregato	Percentuale passante allo staccio di 0,063 mm	Categoria f
Grosso	$\leq 0,5$ ≤ 1 ≤ 2 ≤ 4 > 4	$f_{0,5}$ f_1 f_2 f_4 $f_{Dichiarata}$
	Nessun requisito	f_{NR}
Fine	≤ 3 ≤ 10 ≤ 16 ≤ 22 > 22	f_3 f_{10} f_{16} f_{22} $f_{Dichiarata}$
	Nessun requisito	f_{NR}

Tabella 3.17- Granulometria Filler Omya

In particolare, per gli aggregati fini se $P_{0,063} > 3\%$ è necessario verificarne la qualità (requisiti fisici).



Figura 3.10- Filler

Setaccio (mm)	Passante (%)
31,5	100
20	100
16	100
12,5	100
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	100
0,25	98,6
0,125	90,2
0,063	77,6

Tabella 3.18- Granulometria Filler Omya

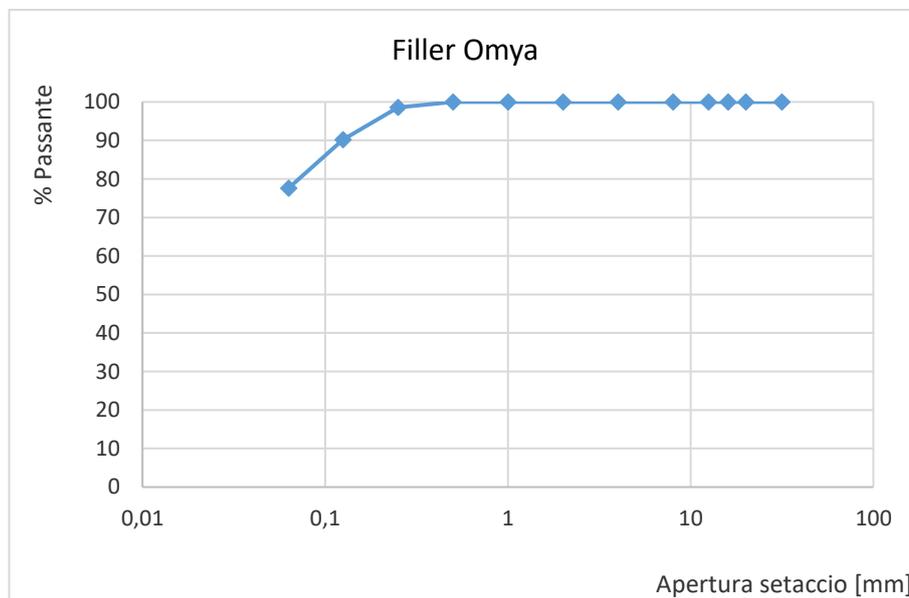


Figura 3.11- Granulometria Filler

3.1.2 Bitume

Come definito nella norma UNI EN 12597 “*Bitumen and bituminous binders*”, il bitume è un “materiale virtualmente non volatile, adesivo e impermeabile derivato dal petrolio greggio oppure presente nell’asfalto nativo; completamente o quasi completamente solubile in toluene, molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente”.

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 quanto 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. Inoltre, si può sfruttare la termo-dipendenza del materiale. Le proprietà del bitume variano infatti al variare della temperatura cui risulta sottoposto. Ciò permette di ottenere un materiale semiliquido (quindi facilmente lavorabile) alle temperature di miscelazione e compattazione, e semi-solido (quindi compatto e resistente) alle temperature di esercizio. Occorre però considerare che la termodipendenza permane anche all'interno del range delle temperature di esercizio, aspetto che può determinare un diverso comportamento dello stesso materiale quando sottoposto a condizioni climatiche differenti. Contemporaneamente, il bitume è anche un materiale viscoso, caratteristica che lo rende tempo-dipendente, cioè il suo comportamento risente della frequenza con cui viene caricato (le proprietà variano al variare della velocità con cui transitano i veicoli sulla pavimentazione in esame). Occorre pertanto prestare particolare attenzione alla scelta del legante più idoneo a seconda delle condizioni di carico e ambientali cui la pavimentazione sarà soggetta nell'arco della propria vita utile.

Le proprietà meccaniche e fisiche del bitume sono strettamente legate alla sua composizione chimica, fisica e strutturale. Dal punto di vista chimico-fisico, il bitume può essere rappresentato come un sistema multifase che comprende una componente oleosa (saturi e aromatici) all'interno della quale sono disperse sostanze insolubili dette asfalteni. L'insieme di saturi, aromatici e resine viene definita "malteni". Ciascuna componente svolge una specifica funzione: gli asfalteni sono strutture complesse che determinano il comportamento del bitume al variare della temperatura (viscoso, elastico, plastico) e la resistenza alle sollecitazioni meccaniche. I saturi e aromatici sono sostanze chimiche che costituiscono il componente più fluido del bitume ed influiscono sul suo comportamento ad elevate temperature conferendogli la capacità di ricoprire estese superfici di altro materiale. Le resine sono composti solubili viscosi a temperatura ambiente e con notevoli proprietà adesive. Svolgono un'azione disperdente degli asfalteni, conferendo flessibilità e duttilità al bitume quando sottoposto a sollecitazioni.

Il comportamento reologico del bitume dipende dallo stato di aggregazione delle miscele e dunque dal rapporto tra 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.

Per la realizzazione dei provini di conglomerato bituminoso è stato usato un bitume primario 70/100 mostrato in figura 3.12.



Figura 3.12-Bitume 70/100

Le determinazioni che qui seguiranno vengono effettuate per permettere una classificazione e il controllo qualitativo del bitume.

- Penetrazione a 25°C:

Con questa prova si determina la durezza del bitume a temperatura ambiente (convenzionalmente a 25°C) misurando di quanto penetra un ago standardizzato sotto un carico fissato (100 gr) entro 5 s dal momento dell'inizio della penetrazione. Quanto più il bitume è molle tanta più la penetrazione sarà elevata; attraverso questa prova si può operare una classificazione tecnico commerciale dei bitumi in base al loro grado di durezza come intervallo di valori. Il bitume utilizzato nella presente ricerca viene classificato 70/100 avendo una penetrazione compresa tra 70 e 100 dmm

- Punto di rammollimento:

Il bitume viene versato in uno speciale anello di ottone e caricato al centro con una sfera di acciaio di determinate dimensioni e peso, il tutto inserito in un bagno riscaldato; con l'aumento della temperatura il bitume, sotto il peso della sfera, si deforma e si abbassa fino a toccare un traguardo posto a 2.54 cm sotto il piano di partenza. La temperatura del bagno corrisponde al punto di rammollimento, il quale rappresenta la temperatura alla quale il bitume passa dallo stato semisolido allo stato liquido; questo varia in funzione della struttura chimico fisica del bitume in esame.

- Punto di rottura Fraass:

Il bitume, al diminuire della temperatura, diventa fragile; il metodo di prova determina la temperatura alla quale un provino di bitume sottoposto a flessione presenta fenomeni di rottura

(fessure o screpolature). Il punto di rottura Fraass, cioè la temperatura alla quale si presenta la rottura, evidenzia la resistenza meccanica del bitume alle basse temperature. L'intervallo di temperatura compreso tra il punto di rottura Fraas e il punto di rammollimento viene definito come "intervallo di elastoplasticità" nel quale il bitume varia il suo comportamento.

- Perdita per riscaldamento in strato sottile (Rolling Thin Oven Test):

La prova consiste nel riscaldare un sottile film di bitume in una stufa rotante a 163°C per 85 minuti; il risultato si esprime come percentuale in relazione al peso originario prima del riscaldamento, e misura la quantità di sostanze volatili che, nelle condizioni di prova, lasciano il bitume. Si possono eseguire, inoltre, le prove precedentemente descritte sul residuo della prova. Il confronto con i valori determinati sul campione prima del riscaldamento rende possibile una valutazione sugli effetti subiti dal bitume durante la prova (invecchiamento). Generalmente si riscontrano aumenti per quanto riguarda la durezza del bitume, quindi un aumento del punto di rammollimento e una diminuzione della penetrazione. Questa prova simula la tendenza del bitume ad indurire nelle varie fasi di lavorazione del conglomerato bituminoso condotte ad elevate temperature (la miscelazione con gli aggregati e la posa in opera).

Di seguito si riporta la scheda tecnica del bitume utilizzato.

SCHEDA TECNICA

RIGENERVAL

Sito produttivo	Stabilimento di Bologna Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna Stabilimento di Trecastelli Via del Bosco, 27 – 60010 Trecastelli AN
Gradazione	Bitume 70/100
Descrizione del prodotto	Bitume stradale 70/100 per utilizzo di late percentuali di granulato di conglomerato.

Caratteristiche	Proprietà	Metodo	U.d.M.	Prestazione	
				min	max
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	70	100
Consistenza alle temperature elevate di servizio	Punto di Rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	43	51
Durabilità Resistenza all'invecchiamento RTFOT EN12607-1	Variazione di massa	-	%	0,8	
	Penetrazione a 25°C residua	UNI EN 1426	%	50	
	Incremento del punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	9	
Infiammabilità	Flash point	EN ISO 2592	°C	230	

Temperature di utilizzo	Valori indicativi
Temperatura di stoccaggio	°C 150 ÷ 160
Temperatura di stoccaggio prolungato oltre 5 giorni	°C 130
Temperatura impasto con inerti	°C 120 ÷ 160
Temperatura minima di compattazione	°C > 90
Temperatura minima di pompaggio	°C 120

Le caratteristiche dichiarate nella presente scheda sono garantite e sono rilevabili, su campioni omogenei di prodotto prelevati in contraddittorio alla consegna secondo le vigenti norme, in particolare la UNI EN 58 e la UNI EN 12594.

3.1.3 Plastica da rifiuti solidi urbani

Sono state scelte per la realizzazione di provini le plastiche densificate, in “chips” prodotte dall’azienda IdealService Spa, un’azienda attiva da ormai 30 anni nell’ambito dei servizi integrati per l’ecologia, il recupero e l’innovazione energetica. L’azienda con il progetto IBlu è in grado di recuperare e selezionare oltre 270.000 tonnellate annue di imballaggi in plastica e nell’impianto produttivo di Costa di Rovigo ricicla 40.000 tonnellate annue della frazione più complessa (soft packaging) per la produzione di Blupolymer. I prodotti Blupolymer presentano la certificazione ambientale che identifica i prodotti ottenuti dal riciclo delle plastiche post-consumo. Il tipo di prodotti in granuli sono conformi alle norme UNI 10667-1 e UNI 10667-16 (R-POMIX) e sono di diverse tipologie:

- Granulo nelle versioni Blupolymer L o Blupolymer ST
- Densificato nella versione Blu AG

Il prodotto utilizzato per la presente sperimentazione è quello densificato in chips poiché è quello che meglio si presta all’immissione nel conglomerato bituminoso a differenza delle altre tipologie (in foglia ed estruse), precedentemente testate sempre in una sperimentazione svolta all’interno del dipartimento DICEA dell’UNIVPM che risultano rendere difficoltose le operazioni di miscelazione occupando un volume eccessivo e non sciogliendosi adeguatamente nell’impasto.



Figura 3.13-Plastica in chips

3.2 Metodologie di confezionamento e prove

Nel presente capitolo si descriverà l'indagine sperimentale svolta in laboratorio illustrando nel dettaglio tutte le apparecchiature utilizzate e le procedure svolte per il confezionamento e la successiva valutazione delle miscele di conglomerato bituminoso con aggiunta di plastica da RSU. Per ogni miscela, con una diversa percentuale di plastica aggiunta, sono state effettuate le seguenti operazioni di confezionamento dei provini e di svolgimento delle prove.

3.2.1 Mix Design

Con “studio di miscela” (mix-design) si intende l'insieme di attività di studio e di laboratorio che consente di definire la composizione di una miscela, nel rispetto delle prescrizioni di capitolato e delle prestazioni richieste nel progetto esecutivo. La proporzione dei costituenti, nota come “ricetta” di una miscela (mix-proportion), è il risultato finale di una serie di attività complesse che implicano la conoscenza approfondita delle tecnologie produttive e costruttive, delle proprietà dei materiali e delle procedure di prova per la determinazione delle grandezze. Il Capitolato Speciale d'Appalto rappresenta l'anello di collegamento tra il progetto dell'opera ed il progetto delle miscele poiché in esso vengono identificati i materiali richiesti per la realizzazione dell'opera attraverso opportuni parametri e intervalli di accettazione che sono commisurati alle prestazioni secondo il livello di accuratezza scelto. L'abilità del progettista sta nell'adattare il Capitolato al tipo di intervento, al traffico, alle condizioni climatiche e ambientali, interpretando le esigenze del progetto stradale. Per quanto riguarda i materiali che derivano da un processo di produzione in fabbrica come conglomerati bituminosi, calcestruzzi, misti granulari, misti cementati, o un processo di trattamenti in sito o in impianto come la stabilizzazione delle terre, il Capitolato deve fornire la linea guida su cui si basa lo studio della miscela ottimale in termini di composizione e proprietà meccaniche, precisando la metodologia e le tecnologie necessarie alla composizione del prodotto.

Per il seguente studio il mix design è stato calcolato in conformità alle percentuali fornite da Anas, per ogni tipo di materiale.

Setaccio (mm)	Passante (%)
63	100
31,5	100
20	98,4
16	89,632
12,5	76,384
8	62,88
4	44,796
2	31,347
1	20,087
0,5	13,769
0,25	11,011
0,125	
0,063	6,262

Tabella 3.19- Granulometria Mix design

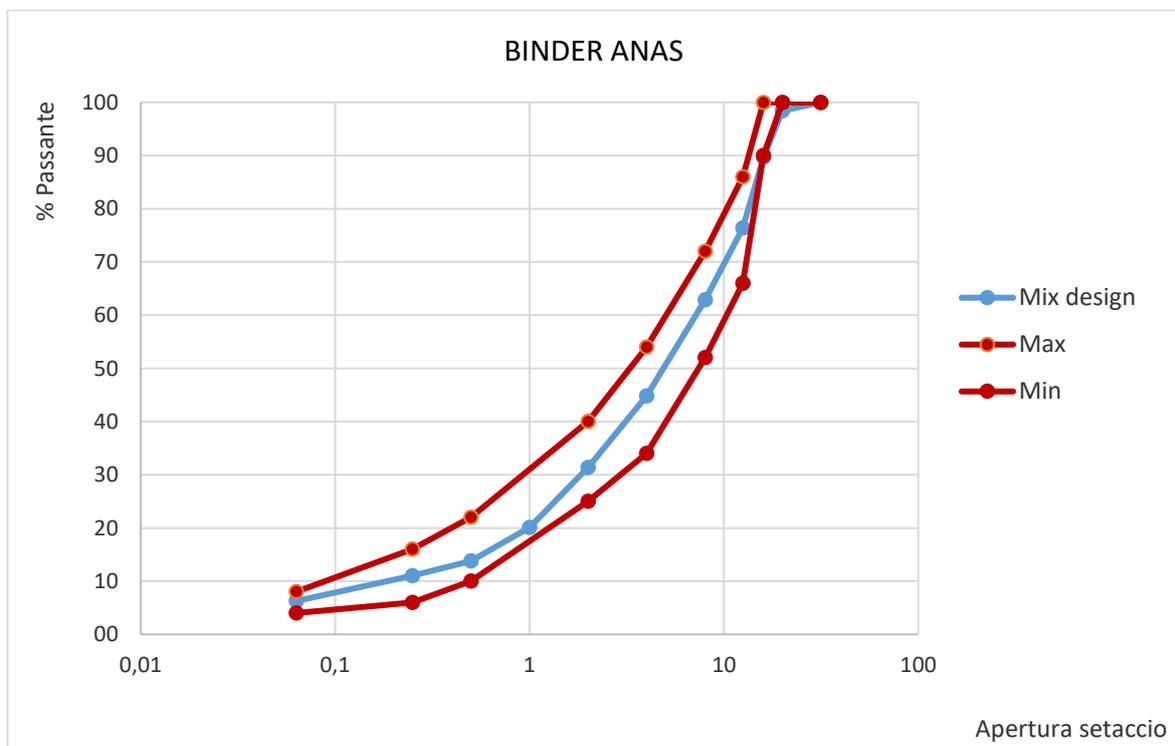


Figura 3.14- Fusi granulometrici con granulometria Mix design

3.2.2 Realizzazione dei provini

I vari aggregati vengono pesati con una bilancia di precisione e disposti in diverse teglie che vengono poste in forno a 170°C per 3 ore al fine di eliminare l'umidità naturalmente presente e per raggiungere la temperatura della successiva miscelazione.

Ugualmente viene posto nel forno per 60 minuti un barattolo di bitume per far sì che diventi liquido e pronto per essere aggiunto alla miscela. Il barattolo contiene una quantità eccedente a quella necessaria per ovviare al problema dell'adesione del prodotto al barattolo durante l'aggiunta nell'impasto.



Figura 3.15 -Materiali in forno



Figura 3.16-Bilancia di precisione



Figura 3.17: Forno

Per l'operazione di miscelazione viene adoperata un'impastatrice meccanica portata preventivamente a 170°C e mantenuta a temperatura costante per facilitare l'esecuzione dell'operazione e per non creare uno shock termico con gli ingredienti precedentemente riscaldati.

La miscelazione viene suddivisa in fasi di diversa durata e dopo ogni aggiunta vengono attivate le pale meccaniche del macchinario che ruotando per un certo tempo consentono di ottenere un impasto omogeneo.

Le fasi della miscelazione sono:

- 1° fase: immissione di aggregati + plastica + miscelazione di durata 120s
- 2° fase: aggiunta del bitume + miscelazione di durata 120s
- 3° fase: aggiunta del filler + miscelazione di durata 180s



Figura 3.18-Impastatrice meccanica



Figure 3.19- Aggregati immessi nell'impastatrice



Figure 3.20-Aggiunta della plastica

Per inserire la corretta quantità di bitume è necessario procedere misurando con una bilancia esterna al macchinario la quantità precisa di prodotto versata nell'impastatrice.

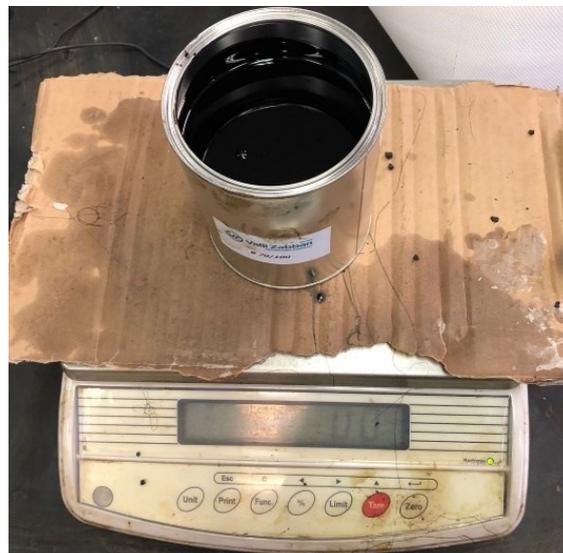


Figure 3.21-Tara bitume



Figure 3.22-Aggiunta del bitume

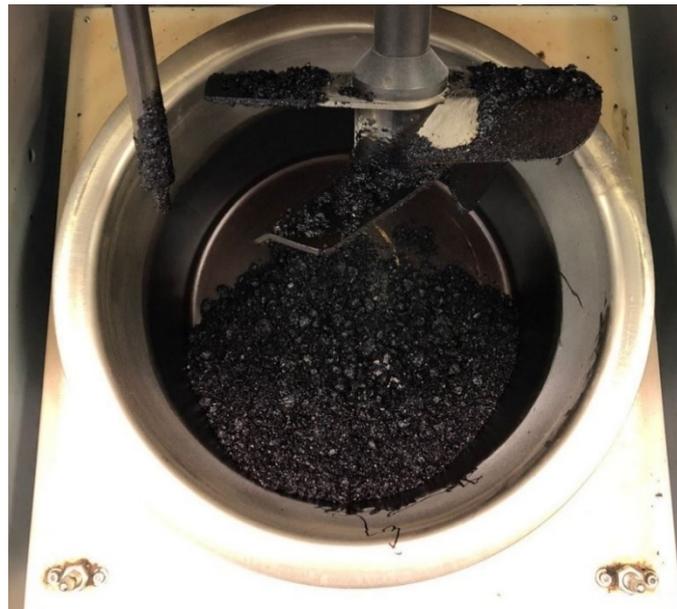


Figura 3.23: Impastatrice con all'interno il conglomerato a fine miscelazione

Completate le fasi della miscelazione si procede con la suddivisione del materiale in 10 parti da 1150g ognuna che vengono disposte in teglie e reinserite di nuovo in forno alla temperatura di 170°C per 30 minuti per simulare la fase di trasporto che avviene normalmente dall'impianto di produzione fino al sito di stesa del conglomerato.



Figura 3.24: Conglomerato diviso in porzioni



Figura 3.25: Porzioni di conglomerato reinserite nel forno

Per ridurre al minimo i tempi di realizzazione dei provini (dalla miscelazione alla compattazione) con il fine di poter sottoporre alle prove questi ultimi nelle stesse condizioni, sono stati realizzati due medesimi impasti da 10 provini.

3.2.3 Compattatore a taglio giroscopico

I compattatori a taglio giroscopici sono apparecchiature in grado di produrre campioni cilindrici di conglomerato bituminoso aventi caratteristiche di addensamento e di distribuzione interna dei granuli di aggregato, molto simili a quelle ottenute in sito mediante compattazione con rulli di cantiere. Il conglomerato bituminoso collocato all'interno di una fustella è sottoposto ad una pressione di addensamento verticale uniforme, la cui risultante avrà una direzione di applicazione inclinata rispetto all'asse della fustella, essendo quest'ultima appoggiata su di una base formante un certo angolo rispetto al piano orizzontale. Simultaneamente, durante il processo di compattazione, la fustella ruota attorno al proprio asse ad una velocità costante prefissata (Figura 3.26). Questa metodologia riproduce molto fedelmente l'addensamento del materiale subito durante la fase di stesa in cantiere.

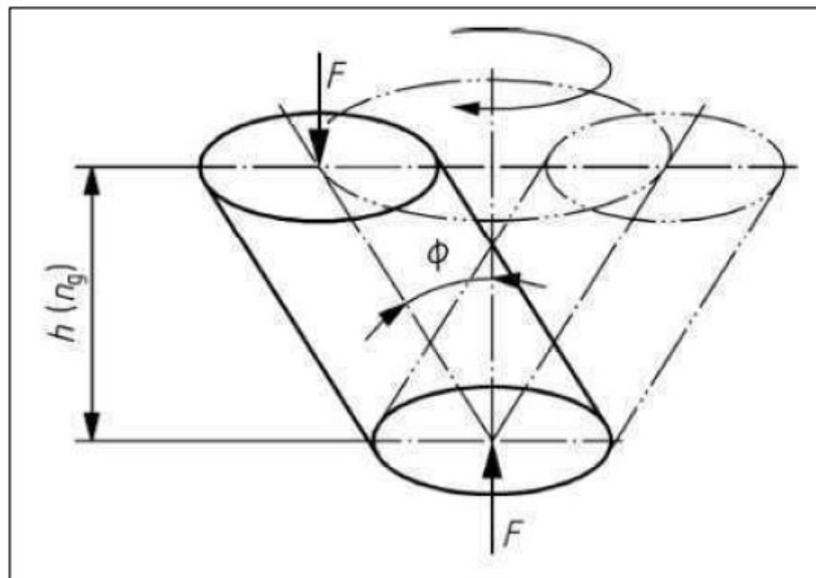


Figura 3.26: schema di applicazione del carico mediante pressa giratoria

Durante il processo di addensamento con la tecnica giratoria, il conglomerato bituminoso subisce una continua riorganizzazione interna degli elementi costituenti che lo portano ad assumere configurazioni corrispondenti a strutture sempre più dense al fine di ottenere campioni sempre più rappresentativi del materiale che verrà posto in opera dai mezzi di cantiere. La compattazione giratoria determina un mutuo incastro tra i grani dell'aggregato, formando così strutture granulari aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in sito. L'azione compattatrice è infatti molto simile a quella determinata dal traffico veicolare (Figura 3.27).

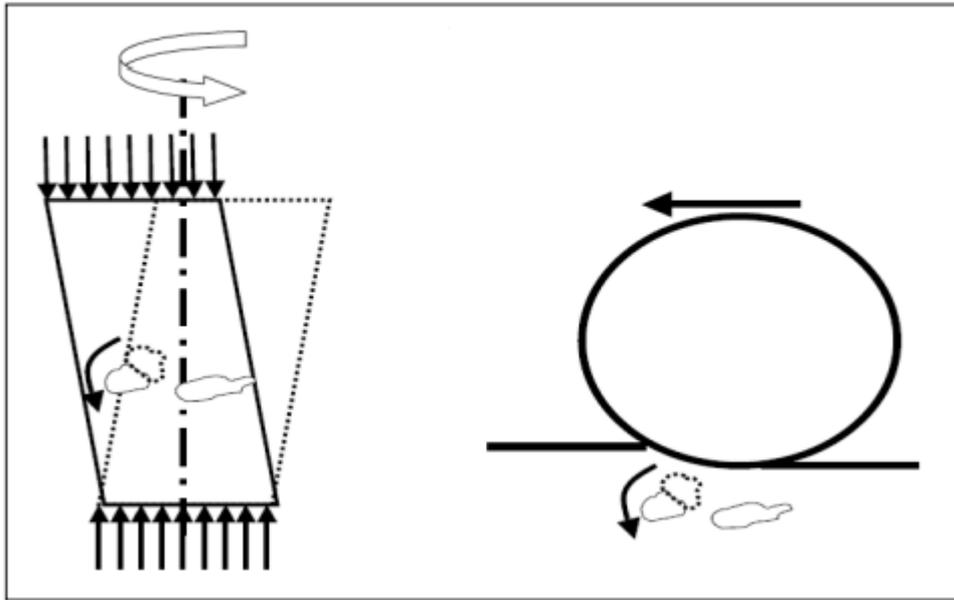


Figura 3.27: effetto della compattazione giroscopica in analogia con l'addensamento in sito.

La pressa giratoria è utilizzata per:

- determinare il volume dei vuoti di una miscela ad un numero di rotazioni stabilito;
- determinare una curva di addensamento in funzione del numero di rotazioni;
- confezionare campioni di una certa altezza, a una predeterminata densità, per dopo sottoporli a diverse prove per determinarne le caratteristiche meccaniche.

Durante il processo di compattazione, il meccanismo di rivoluzione caratteristico della macchina distribuisce l'inclinazione della fustella uniformemente attorno al proprio asse, ad una velocità costante prefissata.

La pressa giratoria è predisposta in modo tale da poter impostare i parametri di prova, tra cui il tipo di prova, cioè se a numero di giri imposto o ad altezza imposta, la pressione e il diametro della fustella. Grazie alla presenza di un pannello di controllo è possibile inserire queste grandezze in input alla macchina e tramite un display è possibile monitorare in continuo l'altezza raggiunta dal provino ad ogni giro; i risultati possono essere visualizzati durante l'esecuzione della prova o salvati per una successiva elaborazione.

Il macchinario è composto da un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella, un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale, e una base rotante.

L'utilizzo di tale macchinario è avvenuto in conformità con la norma UNI EN 12697-31

In questa sperimentazione è stato utilizzato il metodo di compattazione a numero di giri imposti:

- Pressione: 600 KPa;
- Diametro della piastra: 100 mm;
- Numero di giri: 100 e 180, in funzione delle prove successive.

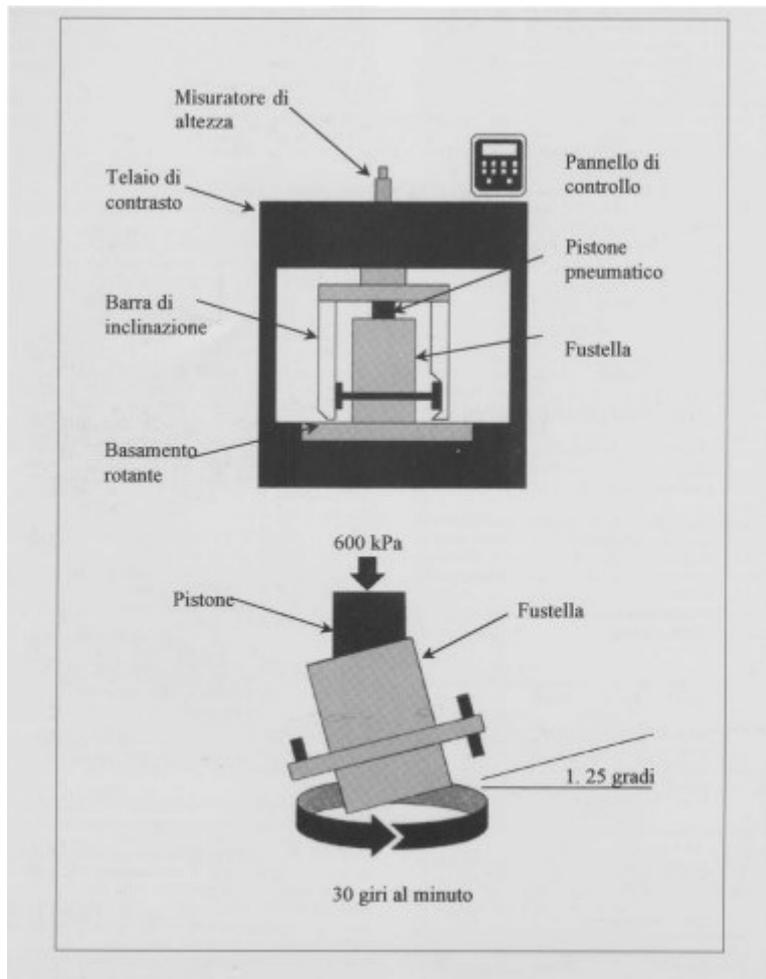


Figura 3.28: schema del compattatore giratorio



Figura 3.29: Pressa a taglio giratoria

La fase di preparazione prevede il riscaldamento in forno a 170°C di ogni singola fustella, prima di inserire in essa una piastra di base ed un dischetto di carta-filtro per evitare l'adesione del provino alla piastra stessa.



Figura 3.30: Fustella 100mm

Riempita la fustella di diametro 100 mm, versandone al suo interno la quantità di impasto di una porzione (1150g), si dispone un dischetto di carta-filtro con su scritto il nome del provino (ad es. 1% Plastica tipo C, 4,4% Bitume) e, in seguito, si inserisce la piastra superiore. La fustella viene inserita all'interno del telaio di carico e si può procedere alla compattazione tramite pressa giratoria.



Figura 3.31: Riempimento fustella con conglomerato bituminoso

La fustella viene inserita all'interno della camera di prova fino ad incontrare l'apposito contrasto posto alla sua base e, tramite il pannello di controllo, si dà inizio alla prova premendo il tasto START.



Figura 3.32: Fustella inserita nella pressa a taglio giratoria



Figura 3.33: Schermo del pannello di controllo della pressa a taglio giratoria

Ripetendo le operazioni per ogni porzione di conglomerato, si confezionano tutti i provini e per quelli da compattare a 180 giri, si registrano le altezze durante l'operazione a: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 e 180 giri.

Dopo aver eseguito il numero di giri preimpostato e finita la compattazione, il macchinario va in modalità "self-parking", il pistone risale, si accende il segnale di "Machine Ready", e si può estrarre la fustella con all'interno il provino compattato.

Mediante un estrattore idraulico si fa fuoriuscire il provino dalla fustella sollevandolo dal basso verso l'alto.



Figura 3.34: Estrazione provino mediante martinetto idraulico



Figura 3.35: Provini realizzati

3.2.4 Determinazione delle caratteristiche di addensamento

Grazie ai valori delle altezze dei provini in funzione del numero di giri registrate e conoscendo la geometria della fustella (diametro di 100 mm), è stato possibile valutare la tendenza del materiale ad essere addensato attraverso l'analisi delle curve di compattazione.

Come è logico attendersi, le maggiori riduzioni di altezza si hanno entro i primi giri, poi, man mano che il volume dei vuoti diminuisce si ha la tendenza a raggiungere un asintoto in corrispondenza dell'altezza finale.

Nella letteratura tecnica legata all'utilizzo del compattatore giratorio, viene data grande importanza sia allo stato di addensamento finale raggiunto dal conglomerato bituminoso al termine della compattazione, sia alle modalità con la quale tale limite viene raggiunto.

Tramite l'analisi di tale andamento è possibile valutare le proprietà volumetriche caratteristiche della miscela durante tutto il processo di compattazione e trarne importanti informazioni. Il grafico che riporta tali informazioni è denominato curva di addensamento (Figura 3.36) e presenta in ascissa il numero di giri di compattazione, in scala logaritmica, ed in ordinata l'addensamento percentuale della miscela C (%) ad ogni giro n .

Tale grandezza è determinata valutando la densità del campione rispetto alla densità massima teorica ρ_m della miscela (0% di vuoti), calcolata in conformità alla norma EN 12697-05.

Come si può vedere nella seguente figura, la curva di compattazione che si ottiene è assimilabile ad una retta avente un'equazione del tipo:

$$C = C_1 + k \cdot \log N$$

dove:

C è il grado di costipamento, ovvero il complementare a cento della percentuale dei vuoti in %;

C_1 è l'addensabilità della miscela dopo il primo giro;

k è la lavorabilità della miscela;

N è il numero di giri compiuti dalla pressa.

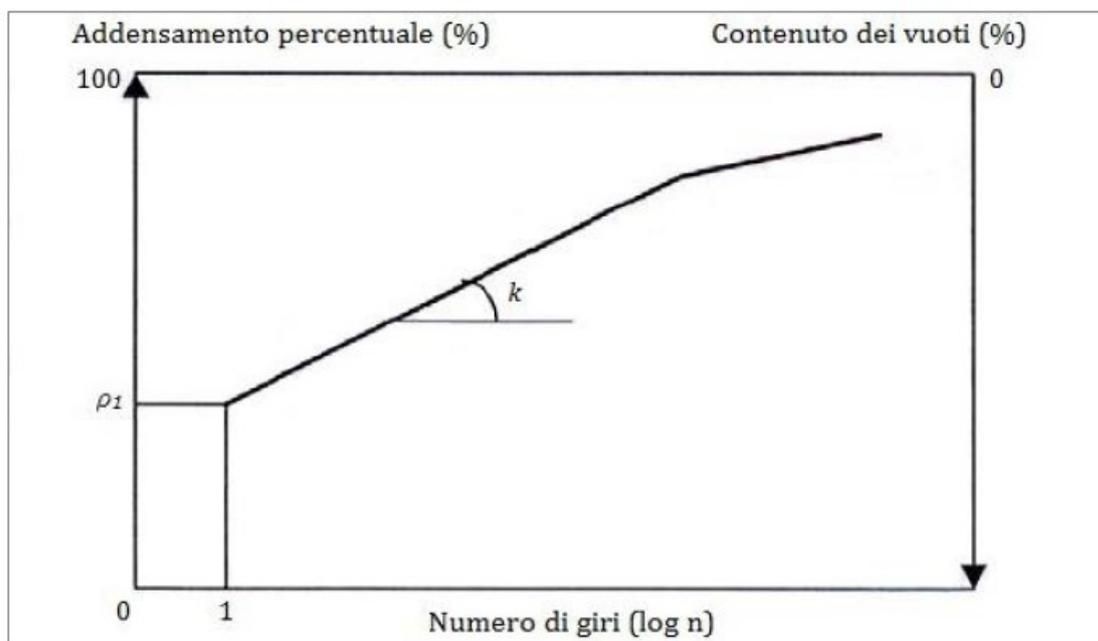


Figura 3.36 Esempio di curva di addensamento.

C [%] viene determinato mediante la seguente espressione:

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

dove:

V_m è il contenuto dei vuoti residui in %;

ρ_m è la massa volumica massima della miscela in kg/m³;

ρ_b è la massa volumica apparente totale della miscela in kg/m³.

Dall'analisi della curva di addensamento del provino si possono trarre alcune importanti considerazioni riguardanti le proprietà di addensabilità e lavorabilità della miscela, espresse rispettivamente dal parametro C1 e da k. In genere valori maggiori di C1 implicano una capacità di autoaddensamento iniziale della miscela migliore; in termini di lavorabilità sono da prediligere quelle miscele che, a parità di altre caratteristiche, mostrano valori di k superiori, ossia una maggiore pendenza della curva di addensamento.

L'addensabilità è legata alle caratteristiche granulometriche degli aggregati ed è tanto maggiore quanto più la granulometria è vicina a quella del massimo addensamento, inoltre varia con il valore d'attrito interno della miscela che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati. La lavorabilità, invece, dipende dalle caratteristiche e dal contenuto di legante ed è associata alla viscosità della miscela.

Per poter costruire questa curva risulta necessario conoscere e quindi misurare sperimentalmente il valore di ρ_b ad ogni giro eseguito dalla pressa. Questo non è ovviamente possibile in quanto tale eventualità richiederebbe l'interruzione della compattazione e l'estrazione del provino ad ogni giro, rendendo inefficace l'addensamento stesso. Si deve, quindi, procedere andando a ricavare il valore di compattazione C_x al giro x-esimo utilizzando il valore della massa volumica apparente (ρ_b) della miscela, misurata al termine della compattazione (180 giri) sul provino finale avente altezza h_{min} , e rapportandola all'altezza h_x

del provino al giro x-esimo monitorata dalla pressa giratoria. Quanto appena esposto è tradotto analiticamente dalla seguente espressione:

$$C_x = \frac{\rho_b}{\rho_m} \cdot \frac{h_{\min}}{h_x} \cdot 100$$

In definitiva, la procedura di prova consiste nell' eseguire la compattazione del provino andando a registrare a tot giri, l'altezza del campione h_x . Al termine dell'addensamento si registra l'altezza finale del provino h_{\min} e si misura la massa volumica apparente ρ_b .

Nota la massa volumica massima ρ_m (descritta nel prossimo paragrafo) è possibile determinare il grado di compattazione C_x al giro x-esimo e quindi la curva di compattazione dalla quale si ricavano l'addensabilità C_1 e la lavorabilità k .

4.4.5 Determinazione delle proprietà volumetriche

La composizione volumetrica delle miscele è una delle proprietà che maggiormente caratterizza il comportamento del conglomerato bituminoso in fase di esercizio. Le miscele sono costituite principalmente da tre componenti, come illustrato in figura:

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

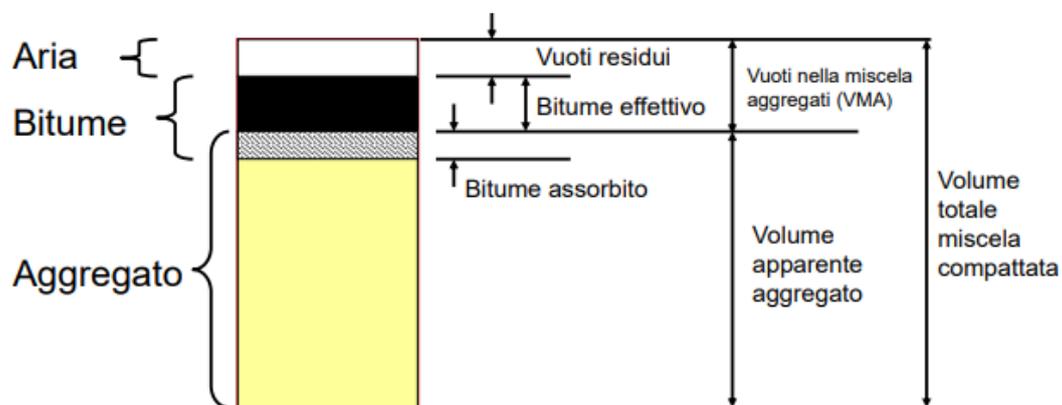


Figura 3.37: Schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

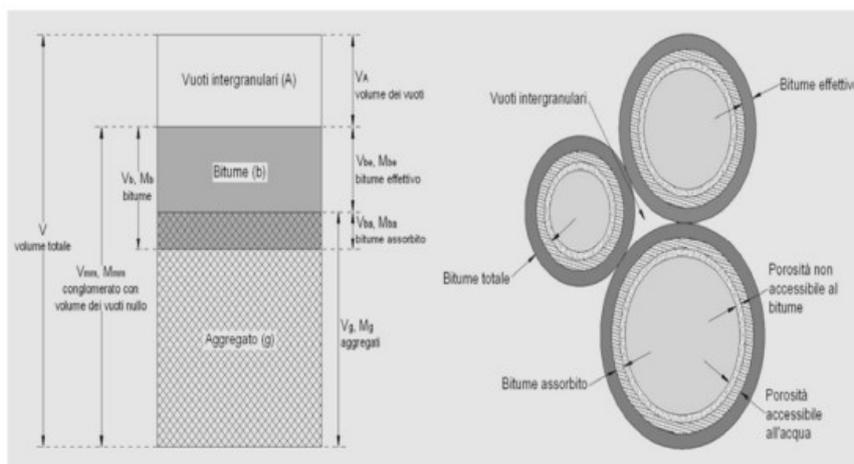


Figura 3.38: Schema dei vuoti in una particella di conglomerato.

Le proprietà volumetriche delle miscele studiate nella presente indagine sono state determinate in termini di contenuto di vuoti residui dei provini compattati, in accordo a quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8:

Di seguito è descritto il metodo per il calcolo volumetrico dei provini analizzati nella sperimentazione:

1) Determinazione della massa volumica massima

La normativa EN 12697-5 permette di determinare la massima densità di una miscela mediante procedura matematica, note le percentuali e le densità degli elementi che la costituiscono che in questo caso sono: aggregati, bitume e plastiche.

Si definisce massa volumica massima ρ_m , la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota.

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

dove:

ρ_m : massa volumica massima della miscela in kg/m³;

p_a : percentuale di aggregati nella miscela in m/m;

ρ_a : massa volumica apparente degli aggregati in kg/m³;

p_p : percentuale di plastica nella miscela in m/m;

ρ_p : massa volumica apparente della plastica in kg/m³;

p_b : percentuale di legante nella miscela in m/m;

ρ_b : massa volumica del legante a 25 °C in kg/m³.

2) Determinazione della massa volumetrica apparente

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. La norma europea UNI EN 12697-6:2020 prescrive i metodi per determinare la massa volumica in mucchio di provini di conglomerato bituminoso compattati in laboratorio oppure ottenuti da carote prelevate da una pavimentazione stradale esistente. Tale norma identifica diversi procedimenti di calcolo.

Per la determinazione della massa volumica apparente sono stati seguiti nello specifico in questa procedura sperimentale i protocolli di procedimento C (procedimento con provino sigillato) e D (procedimento geometrico).

Per il procedimento C si procede in questo modo:

- si identifica il peso di ogni provino mediante una bilancia da laboratorio con precisione al decimo di grammo;



Figura 3.39: Pesa provini.

- si provvede all'impermeabilizzazione di ogni provino immergendolo a più riprese nella paraffina, preventivamente sciolta con l'ausilio di una piastra riscaldante da laboratorio sotto cappa di aspirazione, in modo che la sua superficie esterna risulti completamente rivestita. Questa operazione richiede particolare attenzione, in quanto è necessario che non vengano a formarsi bolle d'aria tra la superficie del campione e la paraffina, le quali comprometterebbero i risultati della prova conducendo ad errori.



Figura 3.40: Paraffina allo stato solido posta su piastra riscaldante



Figura 3.41: Rivestimento provino con paraffina allo stato liquido.

- Dopo aver fatto raffreddare il provino se ne registra il peso a temperatura ambiente mediante la bilancia da laboratorio con precisione al decimo di grammo impiegata prima.



Figura 3.42: Pesa provini rivestiti con paraffina

- si misura la temperatura dell'acqua dove verrà immerso il provino per la successiva pesata idrostatica mediante un termometro da laboratorio digitale con sonda a penetrazione in acciaio inossidabile poiché, la massa volumica dell'acqua varia in funzione della propria temperatura;



Figura 3.43: Controllo temperatura acqua.

- si identifica il peso in acqua di ogni provino rivestito con la paraffina alloggiandolo su un cestello interno ad un bidone pieno di acqua e collegato alla bilancia da laboratorio. La lettura si effettua a completa stabilizzazione nell'acqua.



Figura 3.44- Pesa provini rivestiti con paraffina e immersi in acqua.

Si procede al calcolo della massa volumica apparente mediante la seguente relazione:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)},$$

dove:

ρ_{bsea} è la massa volumica apparente del provino sigillato espressa in g/cm³;

m_1 è la massa del provino asciutto in aria espressa in g;

m_2 è la massa del provino sigillato asciutto in aria espressa in g;

m_3 è la massa del provino sigillato in acqua espressa in g;

ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova espressa in g/cm³;

ρ_{sm} è la massa volumica del materiale sigillante espressa in g/cm³.

Il procedimento D (quello geometrico) permette di determinare la massa volumica apparente ρ_b di ogni provino cilindrico di conglomerato bituminoso mediante la seguente relazione:

$$\rho_b = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} h d^2} \cdot 10^6$$

dove,

ρ_b è la massa volumica apparente del provino espressa in g/cm³;

m_1 è la massa del provino asciutto in aria espressa in g;

h è l'altezza del provino espressa in cm;

d è il diametro del provino espressa in cm.

3) Determinazione del volume dei vuoti

In accordo a quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8, le proprietà volumetriche delle miscele studiate nella presente sperimentazione sono state determinate, in termini di contenuto di vuoti residui dei provini compattati. Il volume dei vuoti V_m si ricava dalla massa volumica massima ρ_m e dalla massa volumica apparente ρ_b mediante la seguente formula:

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

3.2.5 Prova di modulo a trazione indiretta (ITSM-Indirect Tensile Stiffness Modulus)

Le prove di laboratorio per la determinazione del modulo complesso e del modulo di rigidezza sottopongono provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo ed in genere con legge sinusoidale. Negli anni '70 in Gran Bretagna fu ideato un macchinario di prova in grado di applicare un carico dinamico, in configurazione di trazione indiretta, su provini di forma cilindrica e di calcolare direttamente il modulo di rigidezza secondo una procedura notevolmente semplificata: il risultato della prova è definito Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM). Le specifiche del test sono state recepite dalla normativa europea EN 12697-26 (annesso C): "Miscela bituminose- metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo-Parte 26: Rigidezza".

La prova consiste nell'applicare un numero limitato di sollecitazioni di compressione impulsive lungo il diametro verticale di un provino cilindrico, tali da generare una deformazione elastica in direzione diametralmente ortogonale. L'impulso di carico simula lo stato tensionale e deformativo causato dal passaggio di una ruota. L'entità del carico impostato è tale da supporre che il materiale rimanga in campo elastico durante l'esecuzione della prova, per cui la deformazione misurata è di tipo reversibile. È importante sottolineare che il materiale viene assunto omogeneo ed isotropo e si applica la teoria dell'elasticità lineare; lo stato tensionale che si sviluppa all'interno del provino è illustrato in Figura 3.45.

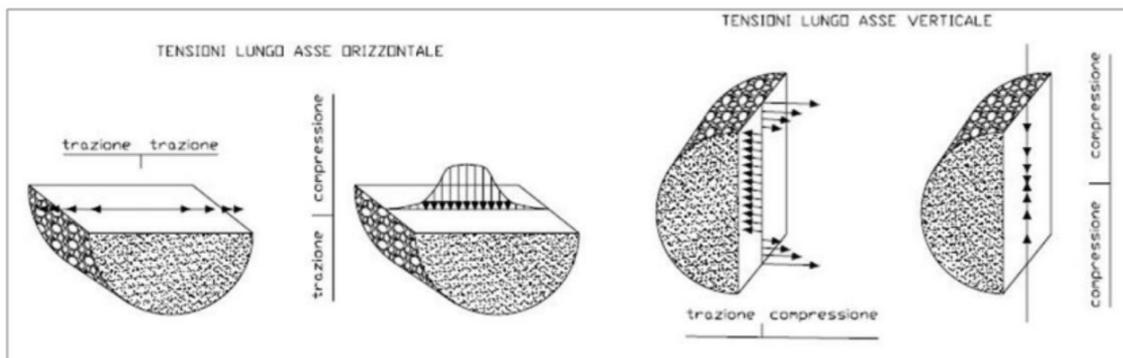


Figura 3.45- Andamento delle tensioni nel provino. Asse orizzontale (sx), asse verticale (dx).

Le sollecitazioni dovute al carico dinamico, che si sviluppano lungo il diametro orizzontale del provino, in particolare sollecitazioni di trazione in direzione X e di compressione in direzione Y, si determinano mediante le relazioni seguenti:

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

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

dove:

P è il carico applicato;

d è il diametro del campione;

t è lo spessore del campione.

Il modulo di rigidezza si esprime pertanto in termini di deformazione di un elemento sottoposto ad uno stato tensionale biassiale. La corrispondente deformazione orizzontale dell'elemento si definisce attraverso l'equazione:

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

dove:

ν è il coefficiente di Poisson;

E è il modulo elastico del materiale.

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

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

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

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

Il modulo ITSM è funzione della geometria del campione, del carico applicato, della deformazione orizzontale e del coefficiente di Poisson.

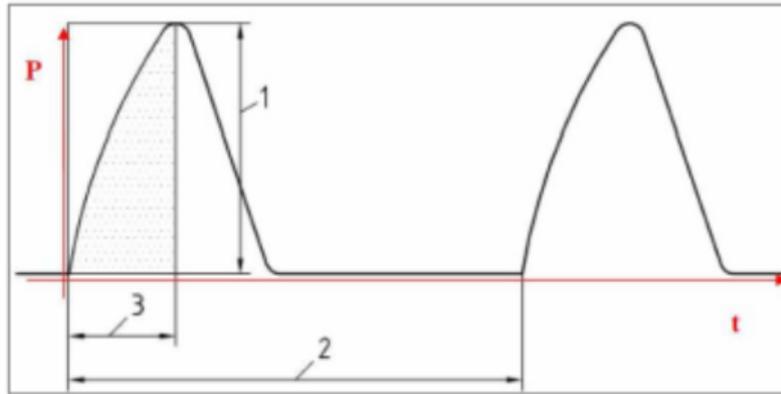


Figura 3.46- Variazione del carico impulsivo P in funzione del tempo.

Il carico applicato P è caratterizzato da tre parametri (Figura 3.46):

1. carico massimo applicato ad ogni ciclo (peak load);
2. intervallo temporale tra due impulsi consecutivi (pulse repetition period);
3. tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il carico massimo (rise time).

Viene definito inoltre il fattore di area di carico (load area factor) come il rapporto tra l'area sottesa alla curva durante il rise time e il prodotto tra rise time e peak load. Quando tale fattore è diverso da 0.60 il modulo di rigidità misurato deve essere corretto tramite la seguente formula:

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

dove:

E' è il modulo di rigidità aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;

k è il rapporto tra le aree;

E è il modulo di rigidità in MPa.

Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $5,0 \pm 0,2$ μm . Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- temperatura: affinché sia valida la formula per il calcolo del modulo E, occorre che quest'ultimo risulti uguale sia a compressione che a trazione. Questa affermazione può essere considerata vera solo per temperature sotto i 25°C. In questo studio le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di 20°C;
- rise-time (tempo di picco): a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In particolare, il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo come mostra la figura 3.47.

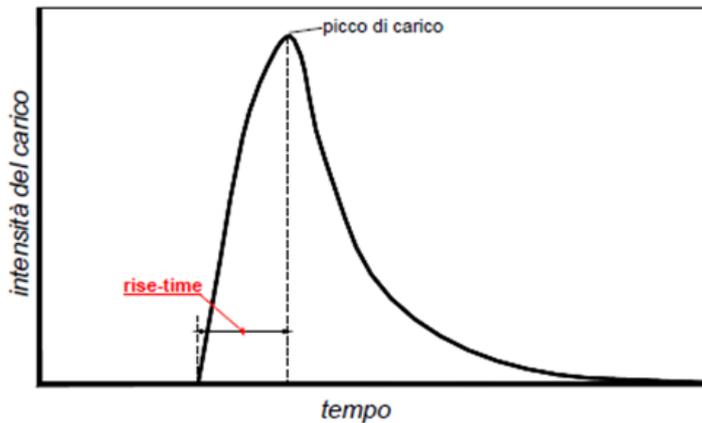


Figura 3.47: Rappresentazione del rise-time di un impulso di carico.

Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidità del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale).

La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot r_i}$$

In questa campagna sperimentale il rise-time è stato mantenuto costante e pari a 124 ms.

- deformazione orizzontale imposta: a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 3 μm ;
- numero di colpi di condizionamento iniziale: si è già visto come, attraverso un sistema di gestione ed acquisizione dati, sia possibile operare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Tali impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione. Per ottenere valori di rigidità affidabili è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente. Pertanto, nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento.

La normativa EN 12697-26 (*annesso C*) descrive le specifiche della macchina utilizzata per la prova di determinazione del modulo di rigidità in configurazione di trazione indiretta. Essa consta di tre parti principali:

- la camera termostatica per il condizionamento del provino;
- l'attuatore e la struttura di carico;
- il dispositivo di prova per il posizionamento del provino.

L'apparecchiatura in dotazione al Laboratorio di Strade del dipartimento DICEA contempla tutte le caratteristiche previste dalla normativa europea (Figura 3.48).

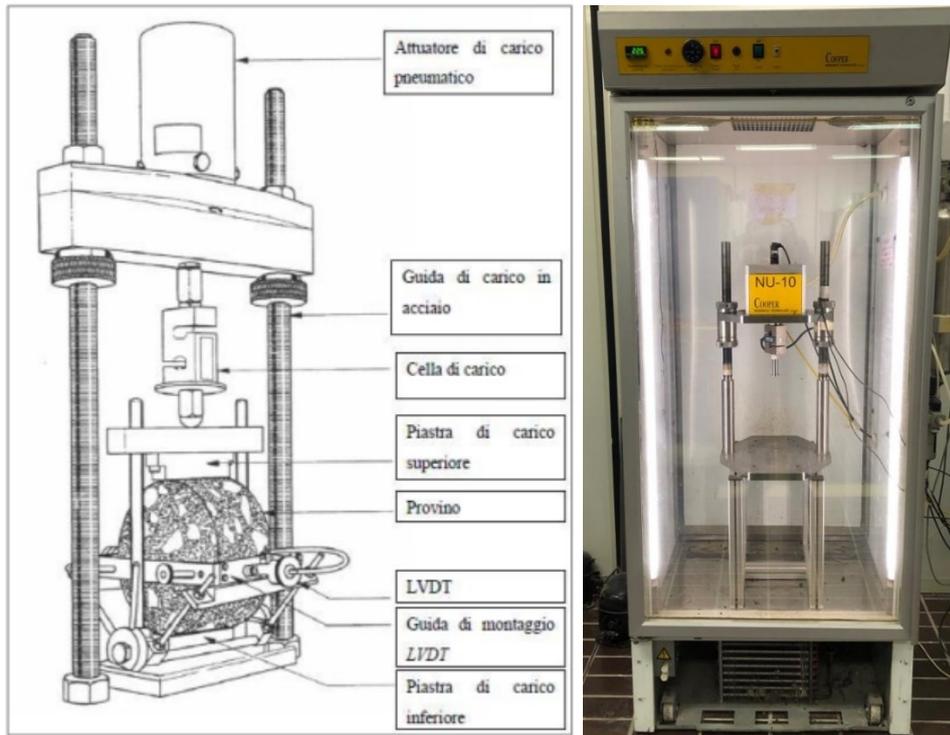


Figura 3.48- Nottingham Asphalt Tester.

La struttura di carico è costituita da una base, due montanti verticali e una trave di contrasto orizzontale che alloggia un attuatore pneumatico per l'applicazione dei carichi verticali. La posizione della trave di contrasto può essere regolata, quindi fissata mediante dadi di serraggio. Collegata all'attuatore vi è una cella di carico per la misura della forza impulsiva applicata. La deformazione orizzontale è misurata attraverso appositi LVDT, posizionati adeguatamente sul provino e collegati al sistema di acquisizione. La struttura di carico è alloggiata all'interno di una camera termostatica che consente la regolazione e il condizionamento del provino. La macchina è completata con un sistema di controllo e acquisizione dati e un software per la gestione della prova (Figura 3.49).

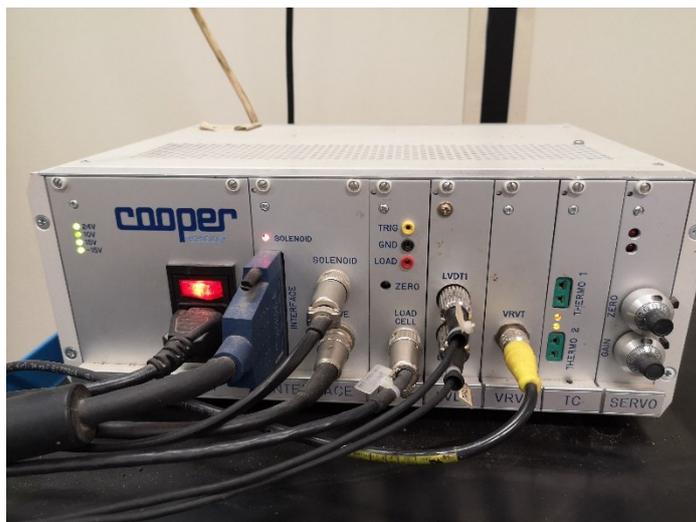


Figura 3.49: Unità di controllo dati.

La determinazione del modulo di rigidezza con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata.

Per quanto riguarda il dispositivo, esso consta di due coltelli di carico che presentano un raggio di curvatura (in funzione del diametro del campione 100 o 150 mm), un supporto metallico vincolato al campione che consente il posizionamento degli LVDT sul diametro orizzontale e un telaio di carico e di montaggio.

- Il telaio principale (Figura 3.50 a) ha la funzione di sostenere il provino, che poggia sul coltello di carico inferiore collocato al centro della base e di consentire il posizionamento dell'anello porta LVDT. Sulle due barre di guida verticali, infatti, sono presenti due accessori scorrevoli che, in fase di installazione, sono opportunamente rialzati (in funzione del diametro del provino), mentre durante la prova sono abbassati per svincolare il provino e gli LVDT dal telaio.
- Il telaio portatrasduttori (Figura 3.50 b) alloggia i due LVDT di spostamento, posizionati in corrispondenza del diametro orizzontale e presenta quattro elementi di serraggio che lo rendono solidale al campione.
- Il coltello di carico superiore (Figura 3.50 c) viene collocato sul provino e presenta la sede di alloggiamento del pistone di carico.

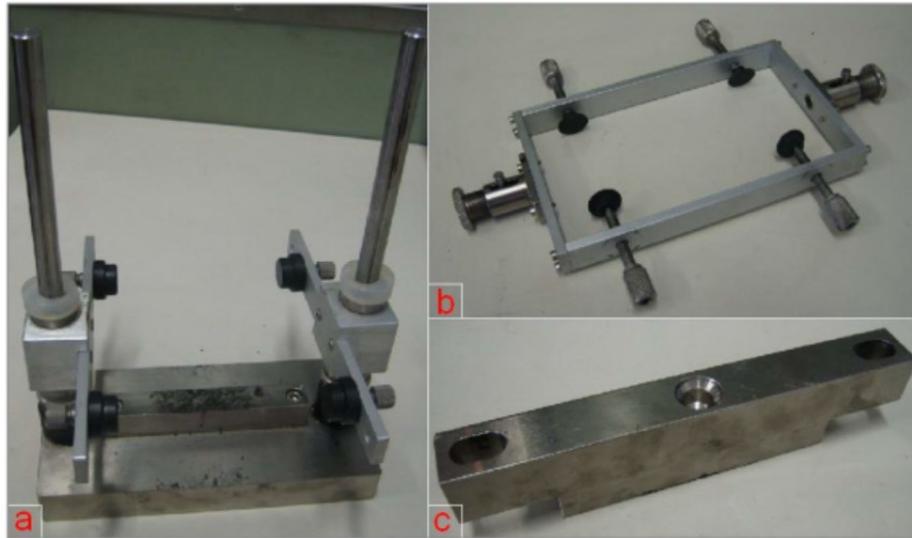


Figura 3.50: a) telaio principale; b) telaio portatrasduttori; c) coltello di carico superiore

La procedura di prova ha inizio con il condizionamento termico del campione alla temperatura desiderata (generalmente 20°C), che può durare diverse ore. Il passaggio successivo consiste nel posizionamento del provino nel dispositivo di prova e di quest'ultimo nella struttura di carico; tale dispositivo viene poi centrato sotto l'attuatore pneumatico. Questa fase è molto importante per una corretta esecuzione della prova ed in particolare è fondamentale che gli LVDT siano adeguatamente regolati e vincolati esclusivamente al provino.

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare in maniera automatica tutte le variabili in gioco: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso 3 μm) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova.

Il controllo di tali grandezze avviene tramite un sistema di gestione che opera in maniera da effettuare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Gli impulsi di condizionamento servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione. Le specifiche condizioni di prova rendono lecita l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di $90^\circ \pm 2^\circ$).

In figura 3.51 è riportato lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il provino durante la prova di trazione indiretta.

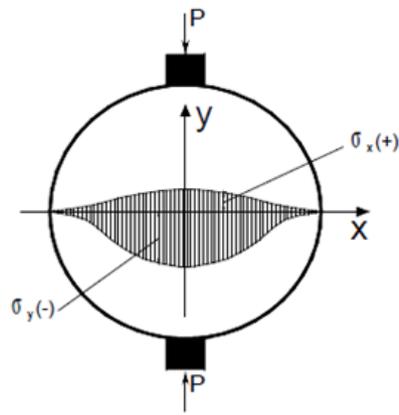


Figura 3.51: Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta



Figura 3.52: Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

La misurazione della deformazione nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico avviene tramite dei trasduttori che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione ogni minimo spostamento. Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti illustrati in Figura 3.53. In tale illustrazione si possono notare i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori (1), 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).

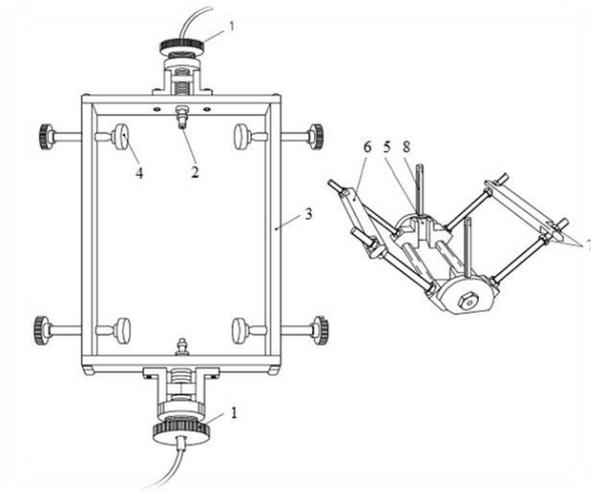


Figura 3.53: Componenti del castelletto

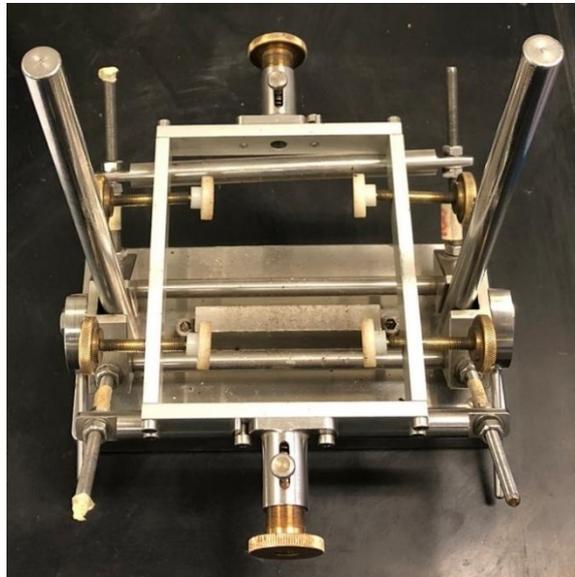


Figura 3.54: Castelletto



Figura 3.55: fasi di regolazione del castelletto e montaggio del provino.

Prima di iniziare la procedura atta alla realizzazione del test, sono state misurate tramite calibro le altezze dei provini con una precisione non inferiore a 0,1 mm, e siccome l'altezza finale derivante dal compattatore giratorio risulta essere imprecisa, si è misurata l'altezza su quattro punti e si è presa come altezza del provino da testare la media dei quattro valori misurati.



Figura 3.56: Misurazione altezza provini mediante calibro

In accordo alla norma UNI EN 12697-26, i provini da testare sono stati inseriti in una camera climatica per essere condizionati termicamente alla temperatura di 20°C, per un tempo di 3h permettendo al provino di raggiungere tale temperatura anche all'interno, con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4 °C.



Figura 3.57: Camera climatica a 20°C

Una volta sistemato il provino nell'apposito telaio si pone quest'ultimo sotto il pistone di carico; vengono inseriti tramite computer i parametri che definiscono le variabili di prova e le dimensioni del campione, poi si dà inizio alla prova.

La prima fase della prova è caratterizzata dagli impulsi di pre-carico che possono variare in numero (in questo caso 10). La macchina ne controlla la forza affinché si raggiungano 3 μm di deformazione orizzontale, operando una serie di loop di taratura. Grazie a questi impulsi di condizionamento si riesce ad individuare il carico da applicare affinché il campione subisca la deformazione orizzontale precedentemente fissata.

Si procede con l'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software. Vanno inseriti i seguenti parametri:

- Test Temperature [$^{\circ}\text{C}$]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- Specimen Thickness [mm]: altezza media 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 3 μm .

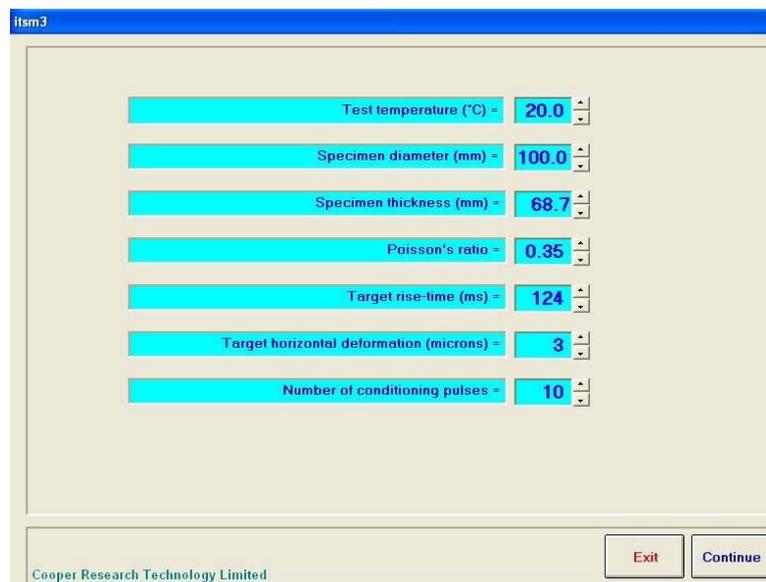


Figura 3.58: Schermata iniziale del software ITSM con dati input.

A questo punto viene inserita la denominazione del provino, che rimane in archivio per il rapporto finale di prova.

Procedendo e cliccando su “Continue” si passa alla schermata dove vanno inseriti i dati riguardanti la data di effettuazione del test, l’addetto che lo esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. Questi dati sono utili solo alla stesura del rapporto di prova.

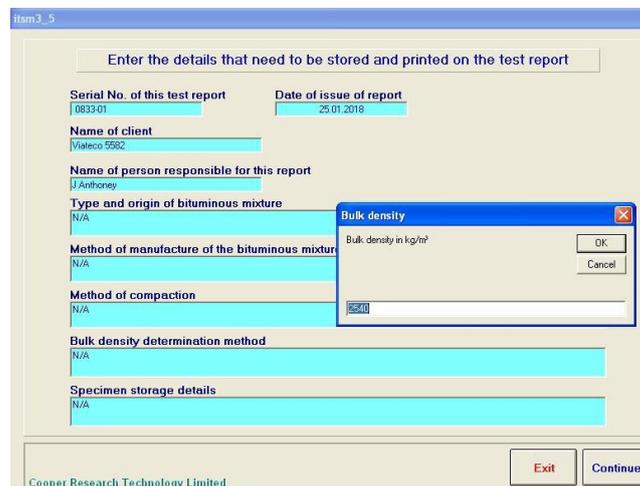


Figura 3.59: Seconda dati effettuazione test.

La schermata successiva è quella utile al controllo del pistone pneumatico; infatti, a questo punto si deve portare a contatto il provino con il pistone per permettere, poi, l’applicazione del carico.

Questa operazione è effettuata automaticamente e cliccando sul pulsante “Make Contact” il pistone si porta a contatto col provino applicando una forza di precarico pari a circa 30N.

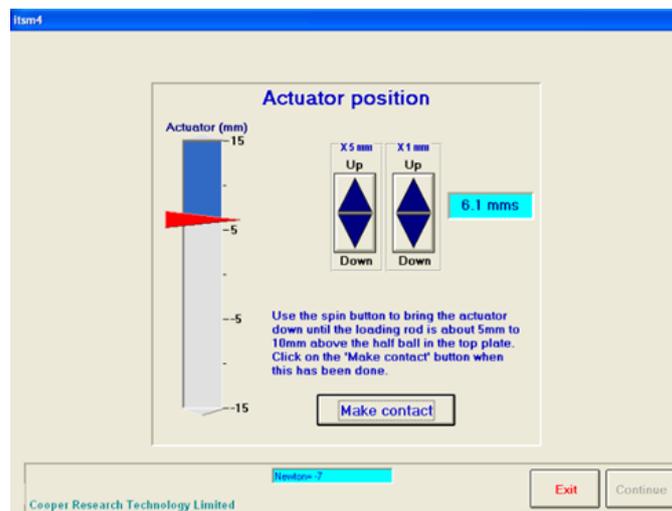


Figura 3.60: Schermata con il comando "Make contact".

Successivamente viene visualizzata una schermata per il controllo del posizionamento dei trasduttori che vanno regolati finché le due freccette diventano rosse come in figura. Se i trasduttori non fossero così regolati la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino, questo porterebbe ad una errata applicazione del carico, in quanto si

avrebbe un'auto-calibrazione errata e quindi il risultato del test verrebbe falsato.

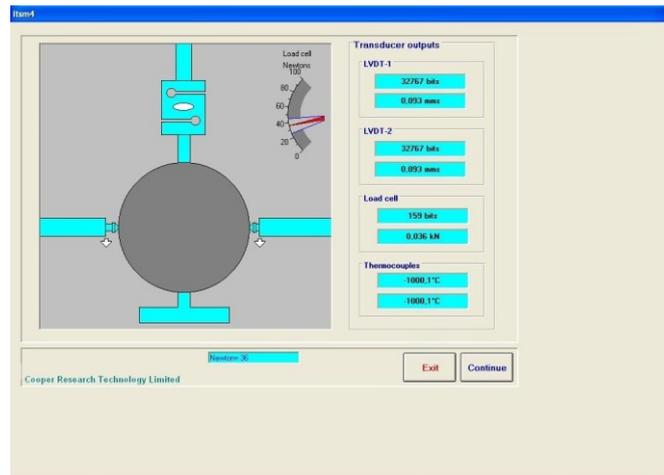


Figura 3.61: Schermata con trasduttori non regolati.

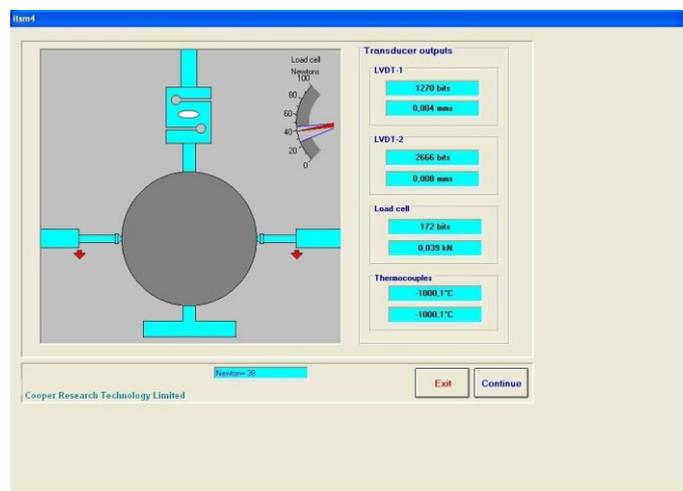


Figura 3.62: Schermata con trasduttori regolati.

Regolati i trasduttori e controllata la temperatura della camera climatica dove è montato il provino, che non dovrà differire da quella di prova di un valore ± 0.5 °C, si prosegue il test cliccando sul tasto “Continue”. A questo punto si passa a una schermata dove vengono visualizzati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di precarico.

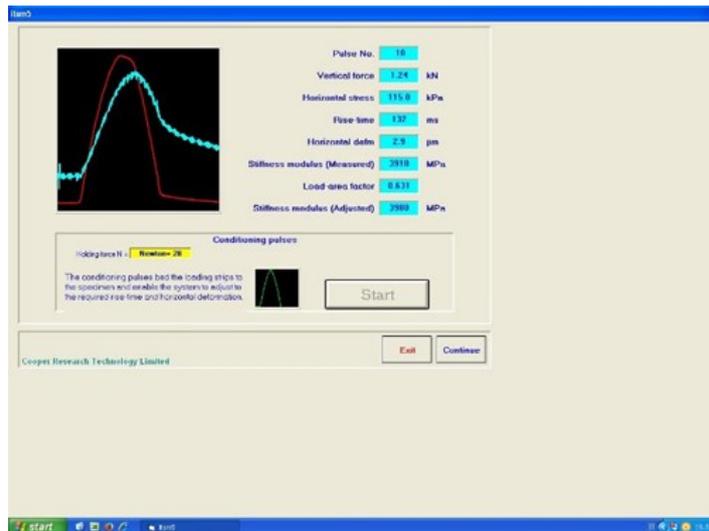


Figura 3.63: Schermata con impulsi di prearico.

Dopo aver fornito gli impulsi sul campione, che saranno caratterizzati da un peak load calcolato nella fase precedente, un pulse repetition period ed un rise time costanti e inseriti nel software al momento dell'inizio della prova, si procede con la fase successiva che è quella del test vero e proprio, in cui avviene la misurazione del modulo di rigidezza (ITSM) e del modulo di rigidezza corretto (ITSM adjusted) (Figura 3.64).

Per i 5 impulsi di prova si visualizzano tutti i risultati, con l'aggiunta dei valori medi per ogni parametro.

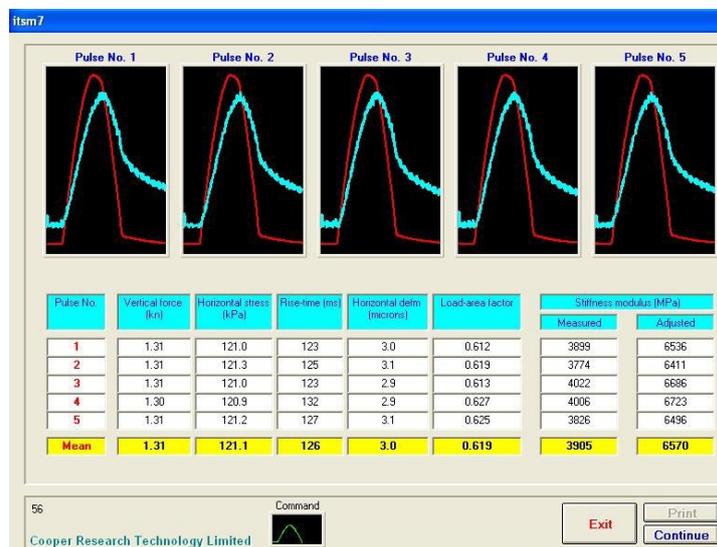


Figura 3.64: visualizzazione dei risultati dei 5 impulsi di prova.

Terminate queste fasi, il campione viene ruotato di 90° e la prova viene ripetuta; la misurazione del modulo, infatti, deve essere fatta almeno in due direzioni ortogonali tra loro; il modulo di rigidezza definitivo è dato dalla media dei moduli nelle due direzioni. Secondo norma, affinché i risultati possano essere considerati validi non dovranno differire di più del 10% e meno del 20% dal loro valore medio.

3.2.6 Prova di trazione indiretta (ITS-Indirect Tensile Strength)

Si definisce resistenza a trazione indiretta ITS, la massima tensione di trazione (calcolata) applicata a un provino cilindrico caricato diametralmente fino a rottura alla temperatura di prova e alla velocità di avanzamento della macchina. Le modalità di prova sono riportate nella norma UNI EN 12697-23. La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C; essa consente di stabilire dei criteri di qualità ed accettabilità delle miscele, sia in fase di studio degli impasti, che di comportamento in opera. In questa indagine, e di norma, la prova è condotta alla temperatura di 25°C. I singoli campioni dopo stoccaggio per almeno 5 ore in cella climatica a 25 °C, vengono posizionati, seguendo una determinata prassi, tra i coltelli della pressa. La collocazione è stata eseguita in modo che l'asse dei provini risulti orizzontale, l'asse del coltello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del coltello inferiore, ed entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino.

Per agevolare la procedura di posizionamento, le bande di carico della pressa sono realizzate in maniera tale che le facce a contatto con il provino, abbiano una superficie concava, con raggio di curvatura corrispondente al raggio nominale del provino.

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova brasiliana, consiste nel comprimere, fino a rottura, un provino lungo un piano diametrale verticale. La rottura nel materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson).

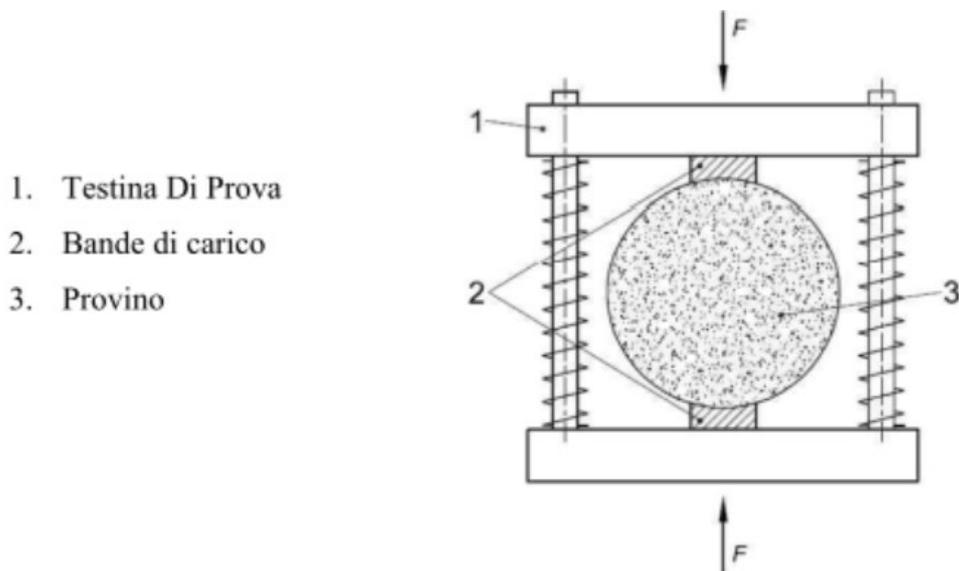


Figura 3.65: Schema di carico della testina di prova per ITS.

Nel rispetto della normativa viene applicato un carico impostando una velocità di avanzamento della pressa costante fino al raggiungimento della rottura del provino. Noto il carico di rottura o carico di compressione massimo misurato durante la prova, il valore della tensione di rottura a trazione indiretta si determina con la seguente relazione:

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

dove:

P_{\max} è il carico massimo espresso in N;
 t è l'altezza del provino espressa in mm;
 D è il diametro del provino in mm.

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione della prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti, la testa di carico superiore. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

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



Figura3.66: Posizionamento del provino tra i piatti della pressa.

I campioni vengono caricati lungo la direzione assiale con una velocità di deformazione costante preimpostata, pari a 50 mm/min, fino all'insorgere della rottura.

Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione.



Figura 3.67: Rottura tipica di un campione per trazione indiretta.



Figura 3.68: Provino rotto dopo la prova.

La macchina di prova può essere guidata mediante un pannello di controllo tramite il software UTM II su un computer. Si impostano parametri di prova come diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova e si ottengono in output oltre alla curva carico-corsa (carico-deformazione verticale) visualizzabile già durante l'esecuzione del test, tutti i punti che formano tale curva, il carico di rottura a compressione e la deformazione a compressione. Dai grafici di output delle prove si potrà facilmente individuare il punto di rottura e con esso il carico. Infatti la curva in essi rappresentata, è caratterizzata da una fase crescente in cui il provino si deforma ed arriva a rottura e una seconda fase decrescente in cui il provino mostra comunque delle risorse di resistenza residue. Nelle figure (3.69, 3.70) si possono vedere i passaggi principali eseguiti con il programma UTM II.

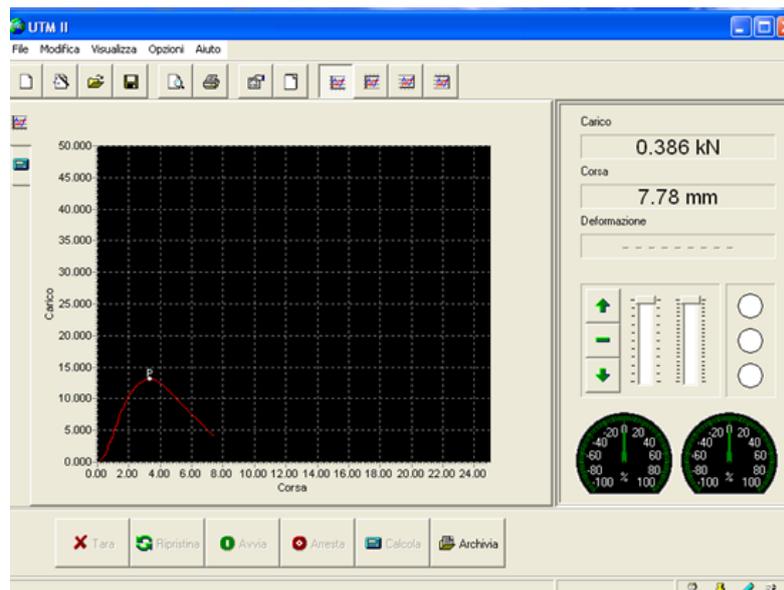


Figura 3.69: Curva sforzo-deformazione risultante dall'applicazione del carico assiale.

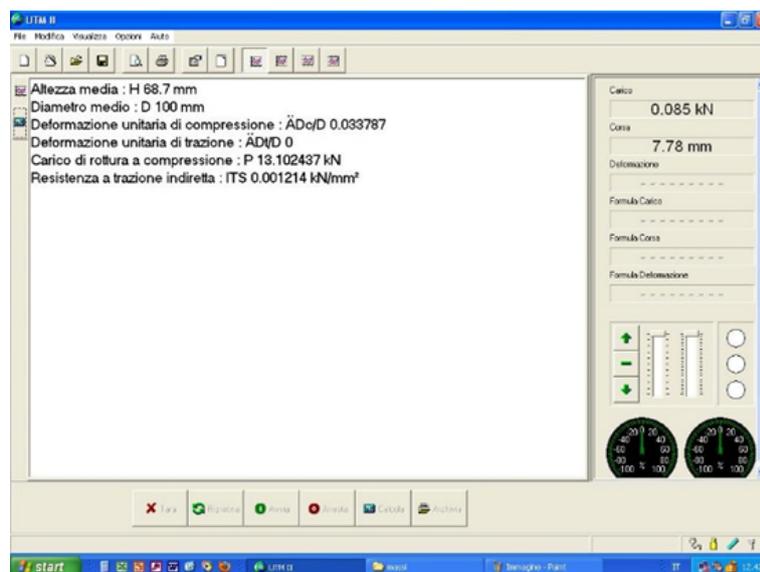


Figura 3.70: Schermata con risultati.

3.2.7 Specifiche di capitolato

Nella presente sperimentazione ci si è attenuti alle prescrizioni fornite dal Capitolato Speciale d'Appalto ANAS relative allo strato di binder tradizionale.

Il capitolato prevede il rispetto di determinati requisiti prestazionali sia per quanto riguarda i materiali impiegati nelle miscele (aggregati lapidei, filler, bitume) che per i conglomerati stessi. La non rispondenza ad uno di questi requisiti può comprometterne l'impiego.

In particolare, i provini compattati mediante pressa giratoria dovranno rispondere a determinati requisiti volumetrici, in termini di contenuto di vuoti residui, e rientrare in intervalli accettabili di resistenza a trazione indiretta (ITS) e del coefficiente di trazione indiretta (CTI).

Da quanto appena detto, si evince la necessità di effettuare un'analisi accurata dei materiali che verranno impiegati nella miscela al fine di scegliere i componenti più adatti per la realizzazione delle miscele.

Nella seguente tabella vengono riportate le specifiche di capitolato alle quali si è fatto riferimento:

Proprietà	Valori richiesti
Vuoti a 100 rotazioni [%]	3% - 6%
ITS [MPa]	0.72 - 1.45
CTI [MPa]	≥ 65 MPa

Tabella 3.20: Requisiti forniti dal Capitolato ANAS.

Apertura setacci UNI	Passante totale in peso (%)
setaccio 20	100
setaccio 16	90-100
setaccio 12,5	66-86
setaccio 8	52-72
setaccio 4	34-54
setaccio 2	25-40
setaccio 0,5	10-22
setaccio 0,25	6-16
setaccio 0,63	4-8

Tabella 3.21: Fusi granulometrici Anas.

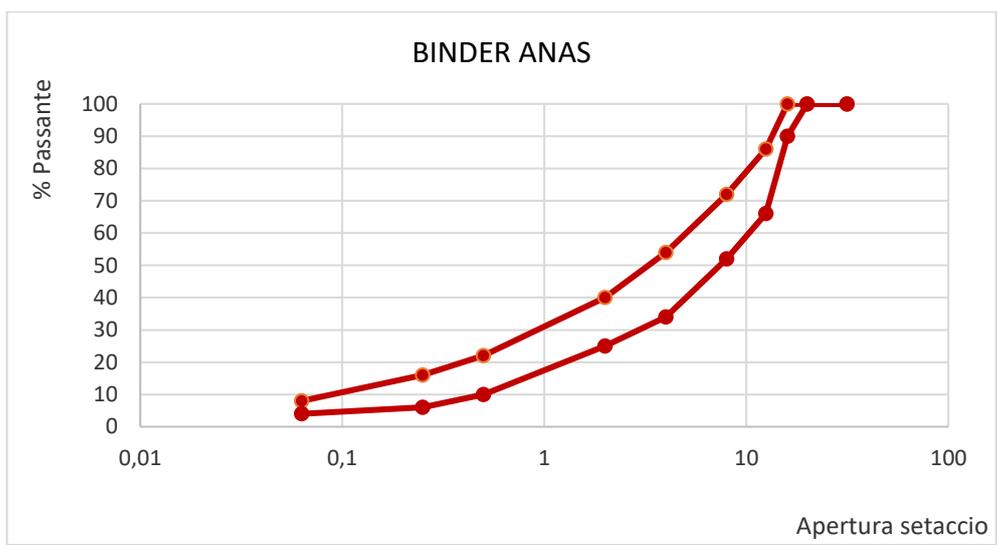


Figura 3.71: Fusi granulometrici Anas

3.2.8 Prova a fatica (ITFT- Indirect Tensile Fatigue Test)

Le prove di laboratorio per la determinazione del comportamento a fatica sottopongono provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo, in genere con legge sinusoidale.

In questo caso la prova a fatica è condotta in configurazione di trazione indiretta (ITFT), sottoponendo i provini cilindrici a carichi di compressione verticale diametrale ripetuti e registrando il numero di applicazioni necessario per provocarne la rottura.

Le specifiche di prova sono state recepite dalla normativa europea EN 12697-24 (*annesso E*): “*Miscela bituminose-metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo-Parte 24: Resistenza alla fatica*”.

La configurazione di prova sviluppa all'interno del provino una sollecitazione di trazione ragionevolmente uniforme lungo il piano diametrale verticale, con direzione perpendicolare a quella del carico applicato, responsabile della rottura stessa, come mostrato nella figura 3.72.

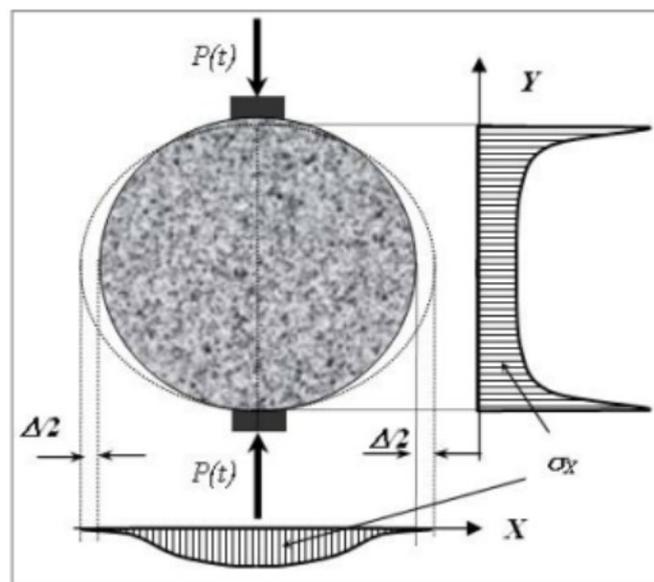


Figura 3.72: Stato di sollecitazione biassiale nella configurazione di trazione indiretta.

La resistenza a fatica di un materiale è la resistenza che esso sviluppa a carichi di intensità inferiore al carico che porterebbe ad una rottura immediata del materiale ma che ripetuti ciclicamente con una determinata frequenza e per un determinato periodo portano al collasso del provino. Questa tipologia è molto importante per analizzare le caratteristiche del conglomerato bituminoso in quanto permette una simulazione abbastanza fedele dei carichi veicolari che andranno a sollecitare ciclicamente la pavimentazione in esercizio.

La prova a fatica è stata sviluppata su diversi provini di ogni miscela.

Il provino viene prima condizionato all'interno di una camera climatica per almeno 8 ore a 20°C e poi viene sottoposto al test.

Il macchinario utilizzato per lo svolgimento della prova a fatica è il NAT.

Il provino, a differenza della prova per la valutazione dell'ITSM, deve essere precedentemente dotato di due lamierini incollati, mediante acciaio liquido rapido, in punti diametralmente

opposti, che servono all'alloggiamento dei trasduttori necessari alla misurazione delle deformazioni.

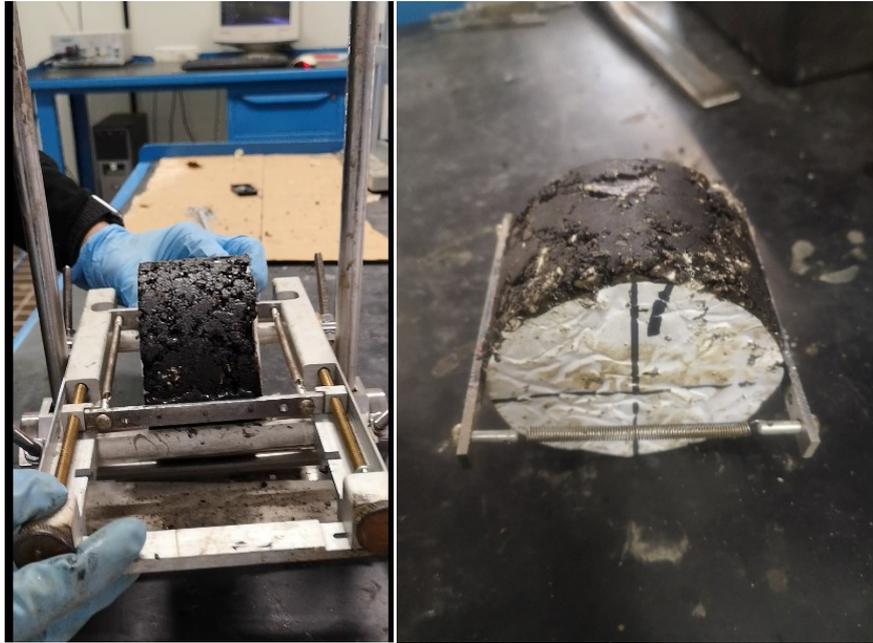


Figura 3.73: Applicazione lamierini su provino mediante castelletto.

Il provino viene successivamente inserito in un castelletto e tenuto fermo dalla barra di carico su cui andrà ad agire il pistone. Il tutto verrà poi introdotto nel macchinario. I trasduttori devono risultare in posizione ortogonale rispetto al pistone.



Figura 3.74: Provino all'interno del NAT su castelletto.

Per costruire la curva di fatica è necessario servirsi di più provini della stessa miscela che verranno sottoposti a stati tensionali differenti. Uno studio a fatica è infatti qualcosa di più ampio di una semplice prova a fatica e prevede l'esecuzione di più prove a livelli tensionali diversi. È necessario ottenere almeno tre punti nel grafico deformazione-numero di cicli per poter tracciare la retta di interpolazione.

Tali valori si determinano a tensioni che possono andare da 200 fino a oltre 1000 kPa.

Per conoscere il valore della deformazione iniziale ε_0 , che verrà riportata in ordinata, si deve fare riferimento alla prova di modulo a trazione indiretta in controllo di tensione condotta precedentemente alla prova di fatica sullo stesso provino.

Una volta ricavati almeno tre punti del grafico, si procede con l'interpolazione e il tracciamento di una curva di tendenza.

La prova ITFT consiste nell'applicazione di un carico impulsivo di durata 0,1 secondi ad intervalli di 0,4 secondi. Una volta determinato il carico di partenza, lo studio prevede la realizzazione di una serie di prove andando a variare il carico per i diversi provini.

Sono state condotte prove di tre entità diverse su almeno tre provini per ogni tipo di prova (brevi, intermedie e lunghe) in funzione del numero di cicli.

I parametri principali ottenibili dalla prova possono essere determinati come segue:

$$\sigma = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot \Omega}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{2 \cdot \Delta H}{\Omega} \right) \cdot \left[\frac{1 + 3\nu}{(\pi \cdot \nu) + 4 - \pi} \right]$$

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{\Delta H}{\Omega} \right) \cdot 2,1$$

$$S = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right) \cdot (1 + 3\nu)$$

dove:

σ è la tensione sull'asse principale del provino [MPa]

P è il carico misurato [N]

t è l'altezza del provino [mm]

Ω è il diametro del provino [mm]

ε è la deformazione orizzontale [$\mu\text{m}/\text{m}$]

ΔH è la deformazione orizzontale [mm]

ν è il coefficiente di Poisson (=0,35)

S è il modulo di rigidezza del materiale [MPa]

Per l'esecuzione della prova si utilizza un software specifico il quale nelle prime schermate prevede una descrizione della procedura da svolgere come, ad esempio, il posizionamento del provino (figure 3.75, 3.76), mentre la successiva schermata richiede l'immissione di dati:

- Target stress temperature
- Specimen diameter
- Specimen thickness
- Horizontal stress

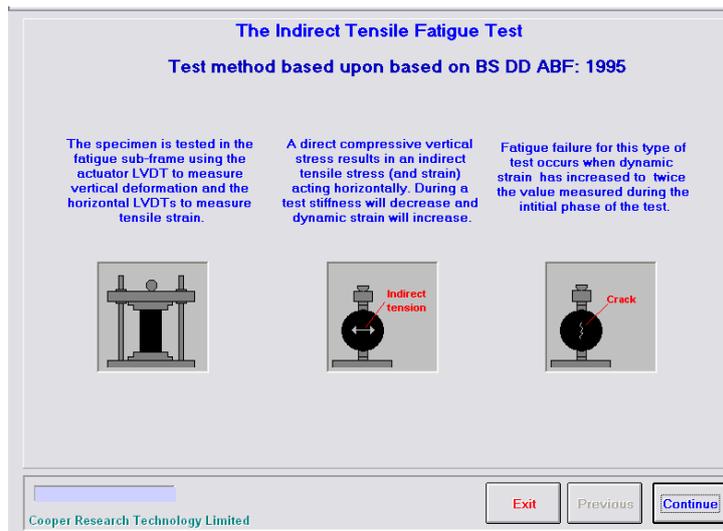


Figura 3.75: schermata iniziale software ITFT.

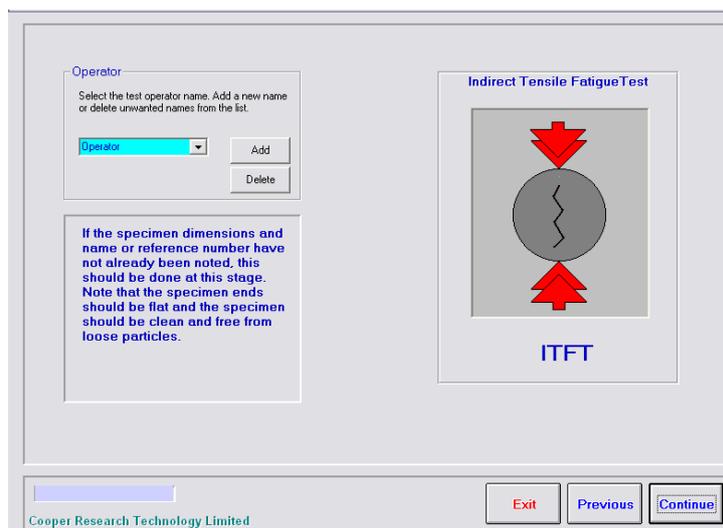


Figura 3.76: seconda schermata software ITFT.

Il software oltre ai dati relativi alla prova gestisce il corretto posizionamento dei trasduttori. Questi ultimi vengono regolati mediante due bulloncini, che permettono la calibrazione, avvitati nei fori presenti sui lamierini e fissati tramite dei dadi.

Il posizionamento corretto è indicato attraverso lo stazionamento delle due lancette sul monitor nel tratto compreso tra le due zone rosse in prossimità del valore 1 (figura 3.77).

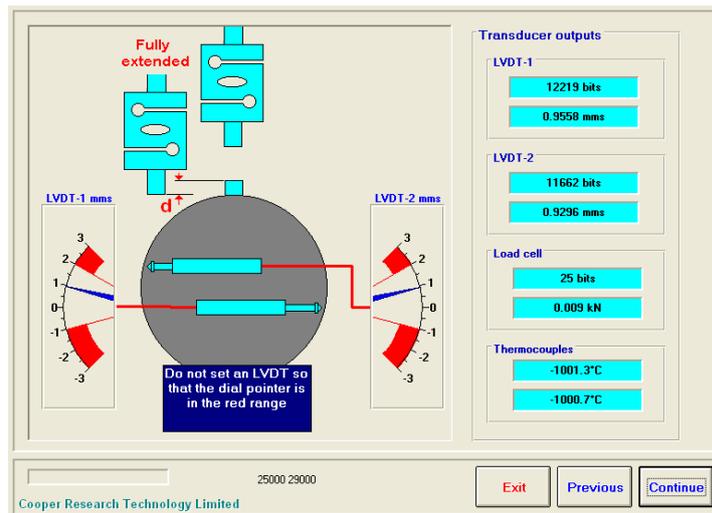


Figura 3.77: posizionamento dei trasduttori.

Dando inizio al test, cliccando sul tasto “start test” che appare sul monitor, il pistone andrà a contatto con la barra di carico e la prova si avvierà. Il procedimento si arresterà automaticamente al raggiungimento del punto di rottura del provino.



Figura 3.78: Provino al raggiungimento del punto di rottura.

3.2.9 Estrazione del bitume dal conglomerato e controllo della plastica sciolta

Alla fine di tutti i test eseguiti sui provini si è voluto indagare sulla percentuale di plastica disciolta nel bitume durante l'impasto del conglomerato sperimentale.

Si procede a questo scopo tramite un'operazione in grado di separare il legante (bitume e plastiche) dagli aggregati lapidei.

L'apparecchiatura (Asphaltanalysator), effettua un lavaggio della miscela utilizzando un solvente (tetracloroetilene), e separa il materiale legante dagli aggregati tramite centrifugazione.



Figura 3.79: Estrattore Asphaltanalysator.

Tramite questa procedura, quindi, si riesce a determinare la quantità di legante estratto dalla miscela bituminosa.

Per eseguire l'operazione, un provino viene inserito in una teglia e messo in forno a 170°C per circa 30 minuti e successivamente viene frantumato.



Figura 3.80: Provino disgregato.

Dopo aver pesato il provino disgregato, il materiale viene inserito nel cestello apposito e collocato nella camera di lavaggio dove verrà sottoposto a 8 cicli di lavaggio con il solvente.



Figura 3.81: Cestello e capsula per estrazione.



Figura 3.82: camera di lavaggio e centrifuga.

A seguito dell'operazione, gli aggregati restano nel cestello mentre i leganti, solventi e filler vengono lavati e separati nella centrifuga. I filler sono trattenuti nella capsula inserita nella centrifuga preventivamente dotata di un foglio di carta filtro dove il materiale fine rimane attaccato.

Terminato il processo di lavaggio, il macchinario procede con l'essiccazione dei minerali. Successivamente il cestello con gli aggregati lavati viene pesato e viene calcolata la percentuale di legante estratto tramite semplici operazioni.



Figura 3.83: aggregati lavati dall'estrattore.

Si riportano i calcoli effettuati per la determinazione della percentuale di bitume e plastiche presenti nell'impasto.

Tara Cestello [g]	Tara Capsula [g]	Lordo Capsula post-estrazione [g]	Lordo Cestello pre-estrazione [g]	Lordo Cestello post-estrazione [g]
3449,9	535,3	599,6	4493,2	4374,4

Filler+Bitume+ Plastica estratti [g]	Filler estratto [g]	Bitume + Plastica estratti [g]	Materiale Totale [g]	Bitume + Plastica sul totale [%]
118,8	64,3	54,5	1043,3	5,22

4 RISULTATI

Nel seguente capitolo si riportano i risultati derivanti dalle analisi sperimentali da me condotte relative alle miscele con una percentuale di plastiche dell'1% e 3% e si comparano i risultati anche con quelli ottenuti da sperimentazioni precedenti alla presente, contenenti varie percentuali di plastica e con quelli di riferimento per ottenere un confronto.

4.1 Addensamento

Si è costruita la curva di compattabilità per ciascun provino compattato a 180 giri.

Nella figura 4.1 sono riportate le curve di compattazione ottenute per i provini di conglomerato bituminoso di riferimento e con lo 0.5%, 1%, 2% e 3% di plastica.

	C1 [%]	k
REF	76,42%	0,04
0,5% C	77,00%	0,039
1% C	77,60%	0,039
2% C	78,38%	0,037
3% C	83,08%	0,031

Tabella 4.1-Addensabilità e lavorabilità delle varie miscele.

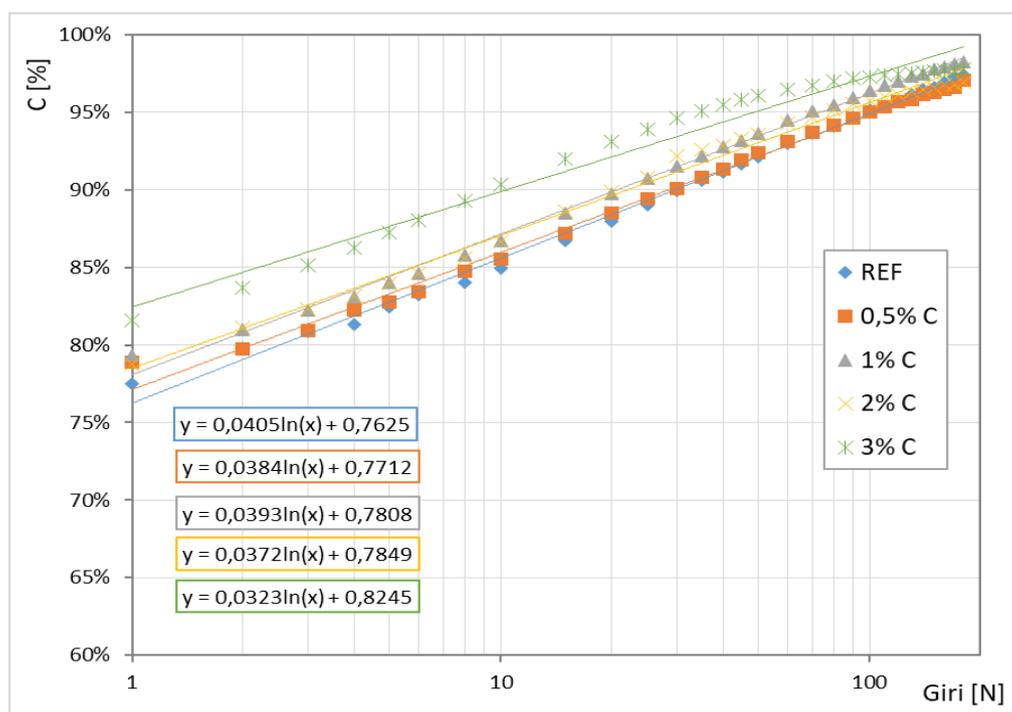


Figura 4.1: Addensamento delle varie miscele.

Dall'esame della figura 4.1 e della tabella 4.1 appare chiaro come l'addensabilità C1 e la lavorabilità K siano del tutto simili per le tre miscele con il dosaggio più basso di plastiche pellettizzate (0,5%, 1%, 2%). Solo la miscela con il 3% di plastiche si discosta sensibilmente dalle altre evidenziando un aumento dell'addensabilità ed una diminuzione della lavorabilità.

4.2 Vuoti

		REF	0,5% C	1% C	2% C	3%
10 giri	V_{m,sea} [%]	15,16%	14,24%	13,29%	13,51%	9,26%
100 giri	V_{m,sea} [%]	5,04%	4,60%	3,72%	4,53%	2,75%
180 giri	V_{m,sea} [%]	2,74%	2,71%	1,77%	3,18%	2,20%

Tabella 4.2-Vuoti delle varie miscele.

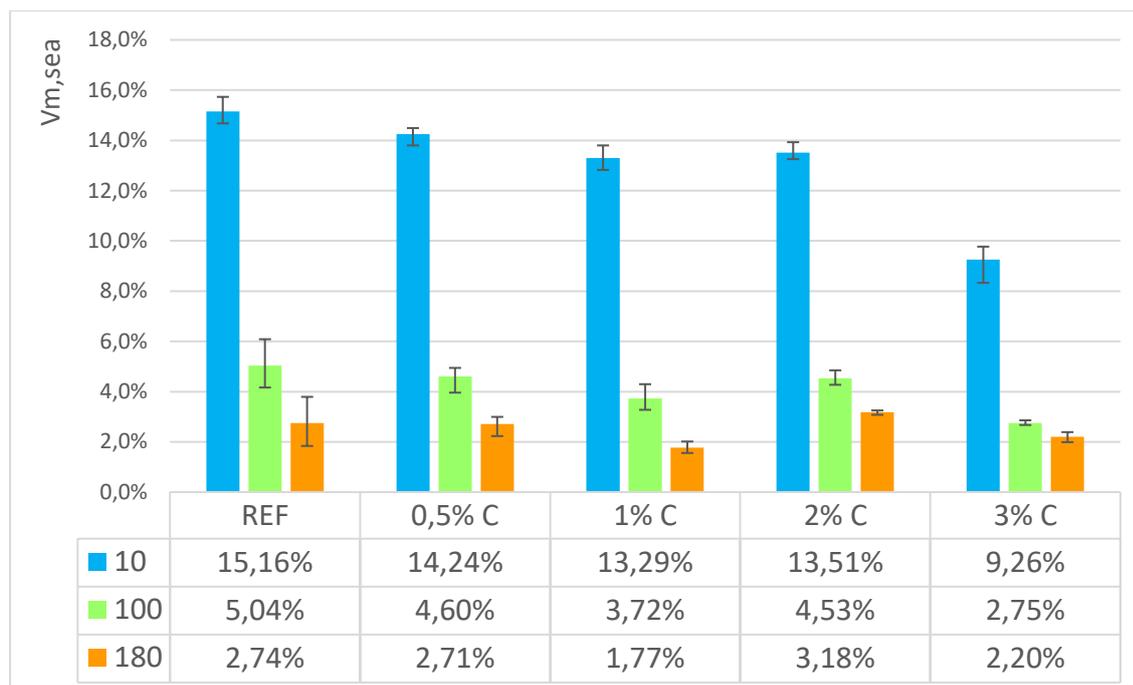


Figura 4.2-Vuoti delle varie miscele.

Il range di accettabilità fornito dall'Anas per i vari livelli di compattazione è:

	V_{m,sea} [%]
10 giri	11-15%
100 giri	3-6%
180 giri	>2%

Tabella 4.3-Accettabilità vuoti Anas.

L'analisi dei risultati evidenzia che, a tutti i livelli di compattazione i vuoti residui delle 5 miscele messe a confronto risultano simili e conformi ai requisiti previsti dal Capitolato ANAS. Questo conferma che per mantenere i vuoti residui nei limiti minimi di accettabilità, all'aumentare del dosaggio delle plastiche deve corrispondere una riduzione della quantità di bitume.

4.3 Modulo

Il comportamento, in termini di risposta viscoelastica, del conglomerato bituminoso è stato caratterizzato effettuando una campagna di studio che prevede l'esecuzione di prove di rigidità, o modulo, sui provini cilindrici realizzati di diametro $d=100\text{mm}$ e altezza variabile, ottenuti mediante compattazione con pressa giratoria. Le prove sono state eseguite alla temperatura di 20°C .

Di ciascun provino, appartenente ad una determinata miscela, è stato, quindi, valutato il modulo considerando i due diametri perpendicolari fra loro. I risultati sono stati mediati e inseriti in un grafico in modo da poter ottenere un confronto fra i conglomerati bituminosi contenenti plastica con diverse percentuali, e il conglomerato bituminoso tradizionale (o di riferimento).

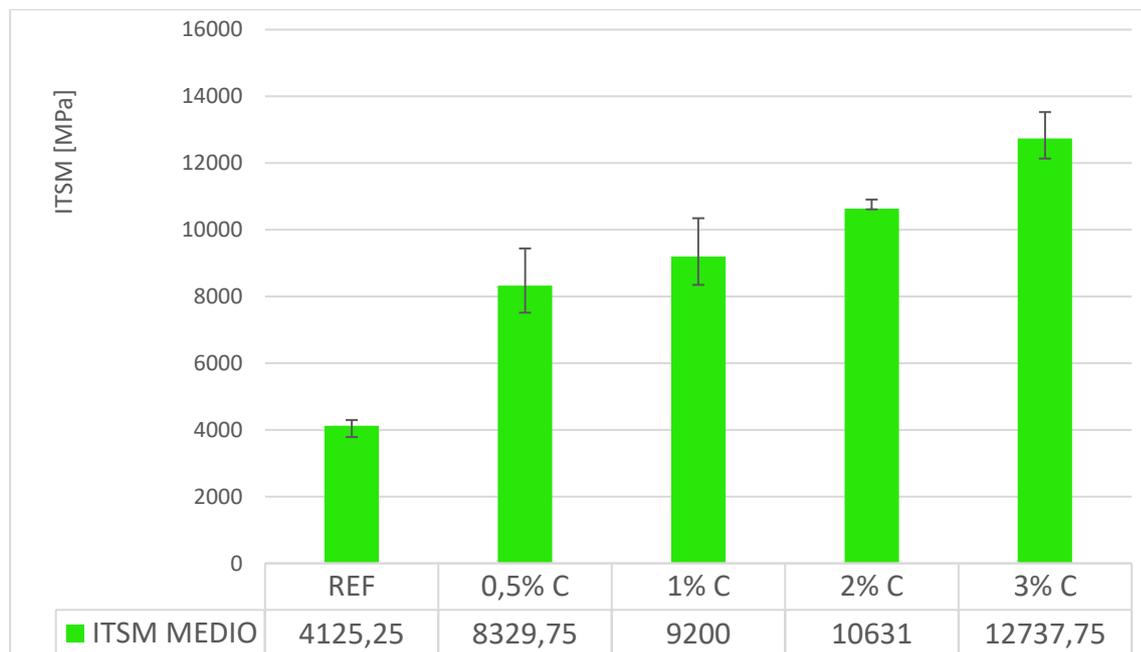


Figura 4.3-Modulo di rigidità a trazione indiretta delle varie miscele.

Dal grafico si può notare che aumentando la percentuale di plastica, aumenta anche il modulo di rigidità a trazione indiretta passando dal valore di riferimento 4125.25 MPa fino al valore 12737.75 MPa della miscela con 3% di plastica.

4.4 Resistenza a trazione indiretta

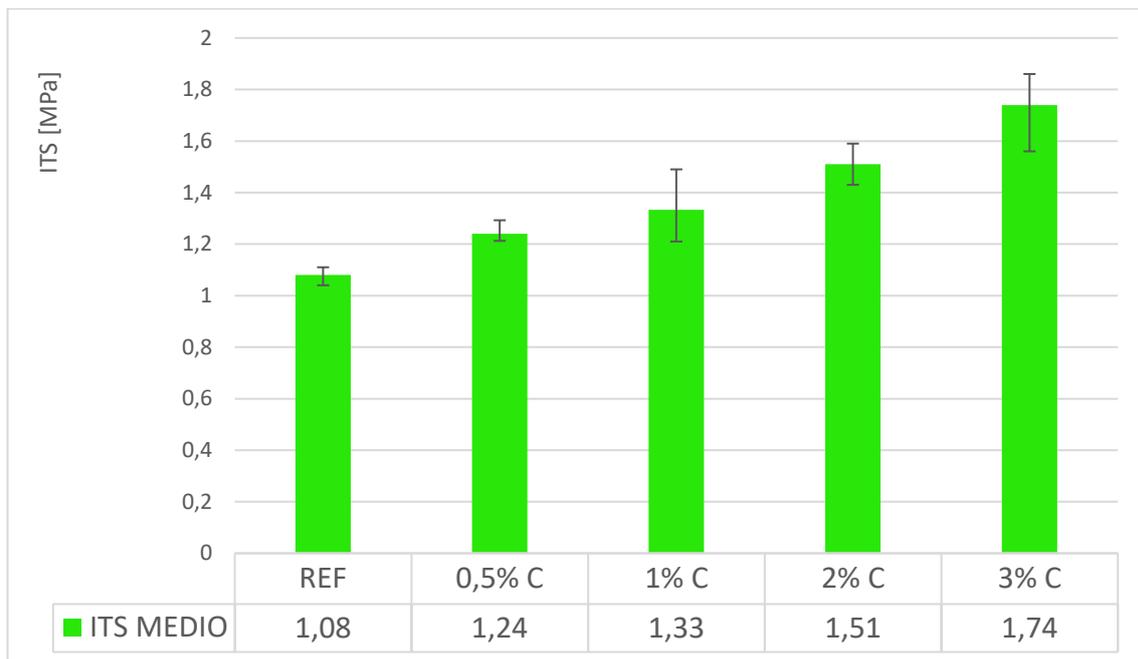


Figura 4.4-Resistenza a rottura per trazione indiretta delle varie miscele.

Dal grafico si può notare che aumentando la percentuale di plastica, aumenta la resistenza a rottura per trazione indiretta.

I risultati ottenuti sono conformi alle prescrizioni del Capitolato ANAS per le prime 4 miscele, di poco sopra al limite superiore (1,70 MPa) per la miscela con il 3% di plastiche.

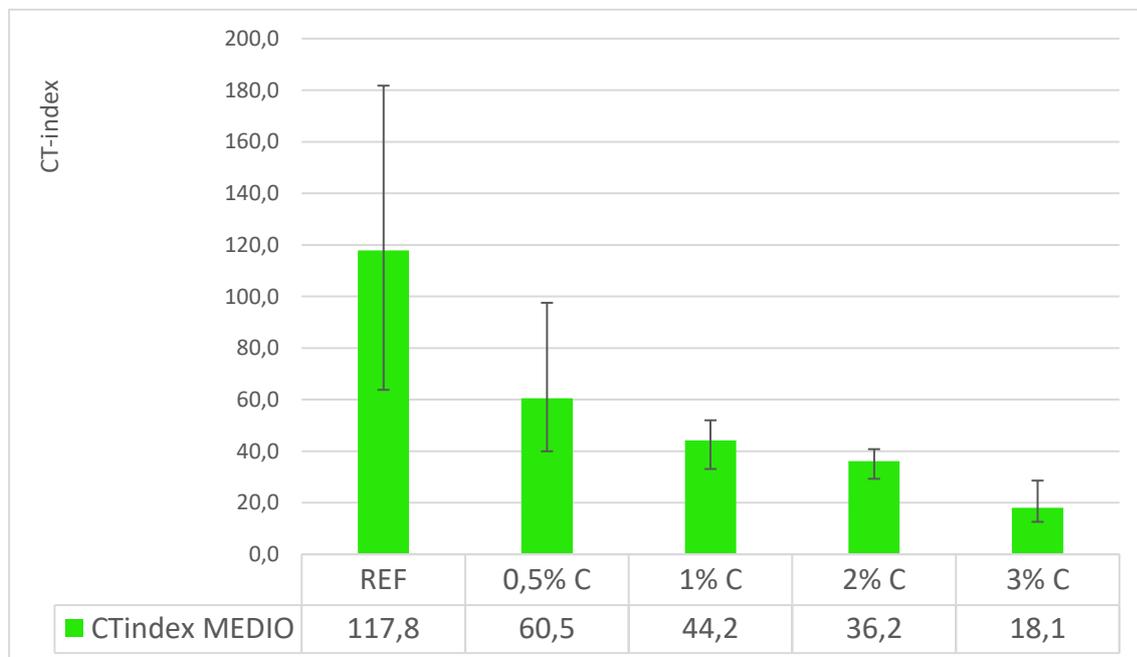


Figura 4.5-CT index delle varie miscele.

Dal grafico si può notare che aumentando la percentuale di plastica diminuisce il CT-index, sintomo di un aumento di fragilità.

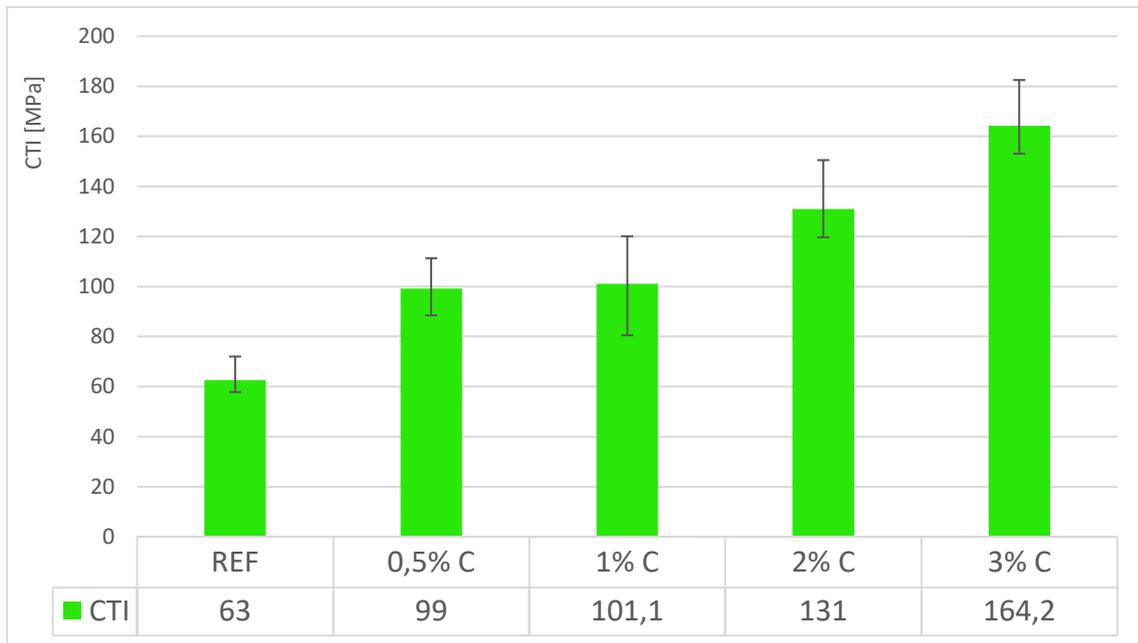


Figura 4.6-CTI delle varie miscele.

Dal grafico si può notare che aumentando la percentuale di plastica aumenta il parametro CTI. Tale parametro si determina dalla prova di rottura a trazione indiretta, mediante la seguente formula:

$$CTI = \frac{ITS}{\varepsilon_{rottura}} \times \frac{\pi}{2}$$

I valori sono conformi al Capitolato ANAS se si prendono come limiti di accettabilità quelli di un binder tradizionale per la miscela di riferimento e quelli di un binder con bitume modificato per le 4 miscele con le plastiche.

4.5 Resistenza a fatica

Tenendo conto che ϵ_0 rappresenta la deformazione orizzontale iniziale all'applicazione del primo ciclo di carico, si riportano di seguito le tabelle e i grafici relativi alle prove di fatica effettuate.

ϵ_0	N° cicli
57,88344	199
140,2908	822
123,7496	459
112,1935	235
137,3764	527
71,8416	229
80,38515	253

Tabella 4.4-Resistenza a fatica in termini di deformazione della miscela REF.

ϵ_0	N° cicli
88,53	112500
121,31	17000
101,10	75000
125,12	11740
73,01	317000
140,23	6460
105,48	14000
103,82	85000
114,87	23500

Tabella 4.5-Resistenza a fatica in termini di deformazione della miscela 0.5%C.

ϵ_0	N° cicli
134,84	18666
154,60	3596
145,51	3766
131,02	4656
110,11	21186
81,99	155826
112,55	10846
144,69	5146

Tabella 4.6-Resistenza a fatica in termini di deformazione della miscela 1%C.

ϵ_0	N° cicli
147,0456	10500
109,4306	67000
142,4972	12460
142,2253	20580
122,4716	15470
80,56593	529500
109,743	47500
110,6414	59000
111,9403	62976
88,01394	257000

Tabella 4.7-Resistenza a fatica in termini di deformazione della miscela 2%

ϵ_0	N° cicli
116,98	26416
88,29	670196
107,05	145926
107,05	78796
132,09	3846
81,14	2000000

Tabella 4.8-Resistenza a fatica in termini di deformazione della miscela 3%C

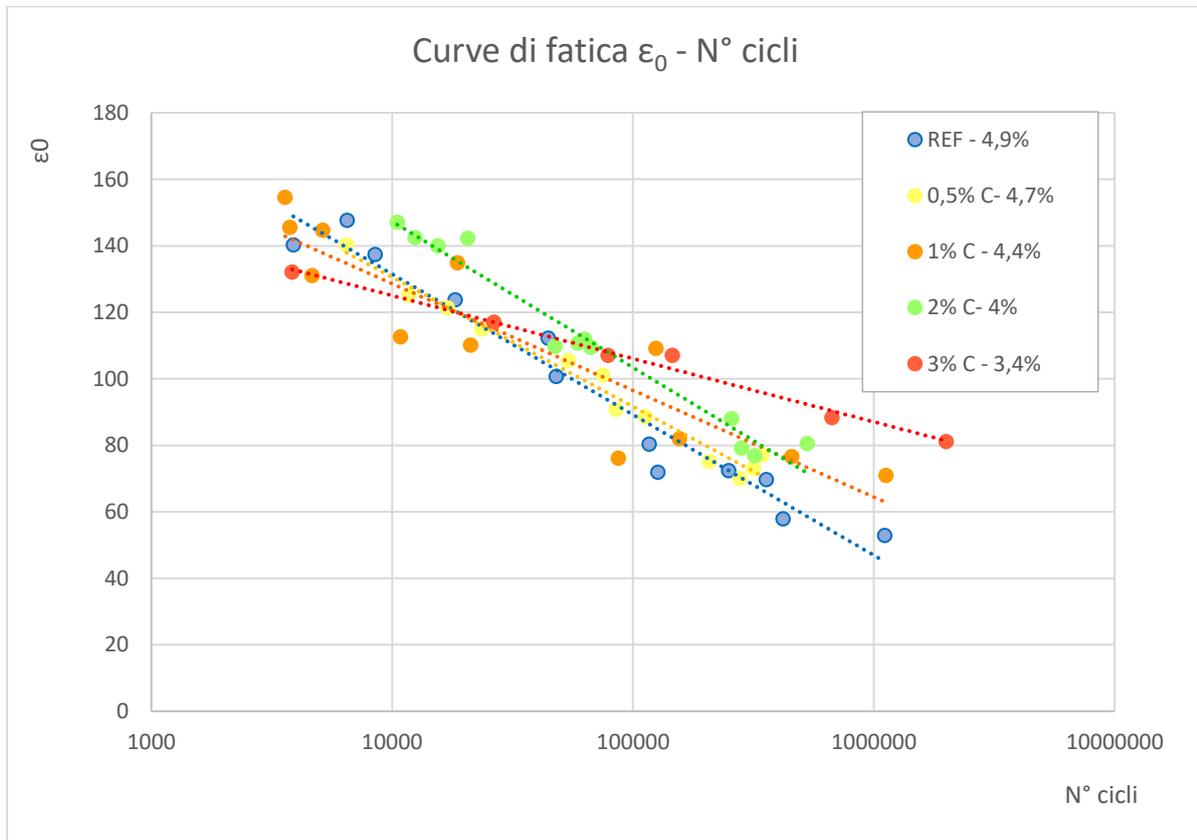


Figura 4.7- Resistenza a fatica in termini di deformazione delle varie miscele.

Dal grafico (figura 4.7) riportante la deformazione orizzontale iniziale all'applicazione del primo ciclo di carico in funzione del numero di cicli, si può notare la differenza nella risposta a fatica delle varie miscele con le diverse percentuali di plastica. In particolare, si rileva un comportamento a fatica sensibilmente migliore all'aumentare della percentuale delle plastiche pellettizzate, più marcato a bassi livelli di deformazione per i dosaggi più alti.

Tenendo conto, invece, che σ rappresenta lo sforzo applicato per i cicli di carico, si riportano di seguito le tabelle e i grafici relativi alle prove di fatica effettuate.

σ [kPa]	N° cicli
125	199
400	822
350	459
250	235
400	527
200	229
225	253

Tabella 4.9-Resistenza a fatica in termini di carichi ripetuti della miscela REF.

σ [kPa]	N° cicli
350	112500
600	17000
400	75000
600	11740
250	317000
600	6460
450	14000
400	85000
500	23500

Tabella 4.10-Resistenza a fatica in termini di carichi ripetuti della miscela con 0,5%C.

σ [kPa]	N° cicli
650	18666
850	3596
800	3766
750	4656
500	21186
350	155826
600	10846
750	5146

Tabella 4.11-Resistenza a fatica in termini di carichi ripetuti della miscela con 1%C

σ [kPa]	N° cicli
800	10500
600	67000
800	12460
800	20580
700	15470
400	529500
600	47500
600	59000
600	62976
425	257000

Tabella 4.12-Resistenza a fatica in termini di carichi ripetuti della miscela con 2%C.

σ [kPa]	N° cicli
850	26416
600	670196
750	145926
750	78796
1050	3846
550	2000000

Tabella 4.13-Resistenza a fatica in termini di carichi ripetuti della miscela con 3%C.

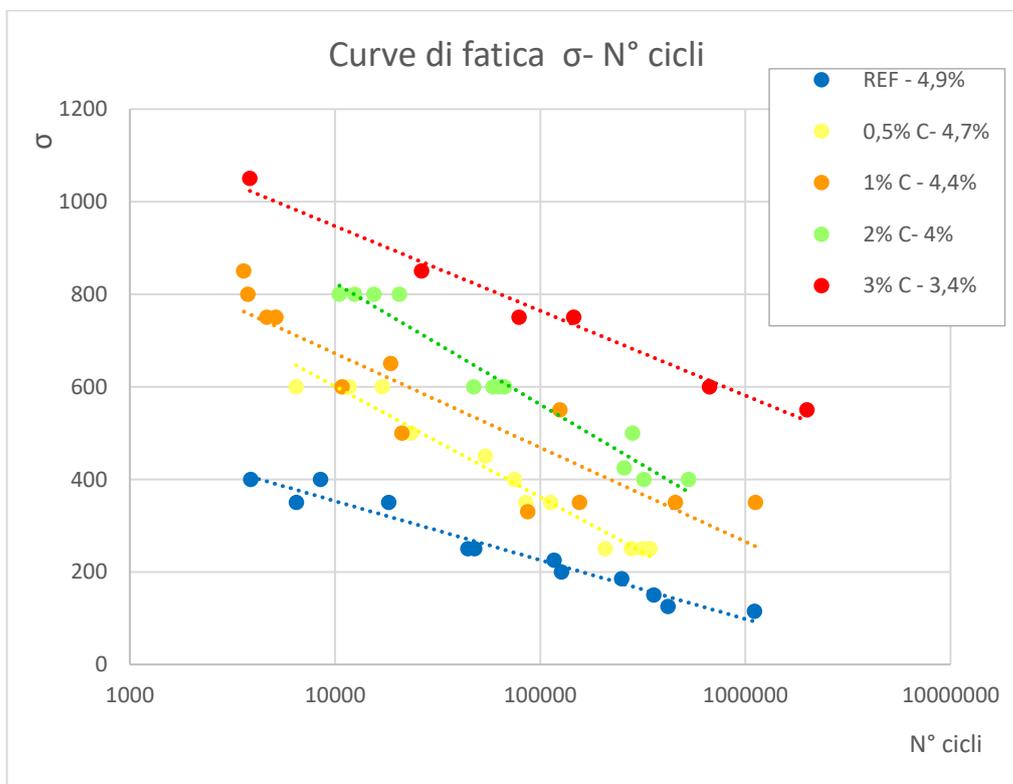


Figura 4.8- Resistenza a fatica in termini di carichi ripetuti delle varie miscele.

Nel grafico di Figura 4.8, dove il confronto è in funzione dello sforzo applicato, le miscele con le plastiche risultano migliori in modo crescente all'aumentare del dosaggio delle plastiche. Va però ricordato che i conglomerati con le plastiche sono molto più rigidi (ITSM crescente con il dosaggio delle plastiche, fino a 3 volte quello di riferimento con il 3% di plastiche) del conglomerato di riferimento. Il confronto è pertanto poco significativo.

Considerato che l'introduzione delle plastiche nei conglomerati bituminosi dovrebbe equivalere alla modifica del bitume con polimeri, nella figura 4.9 viene riproposto il grafico di Figura 4.8 con aggiunta una curva di fatica di un binder confezionato con bitume modificato di tipo hard ottenuta in uno studio precedente (PmB).

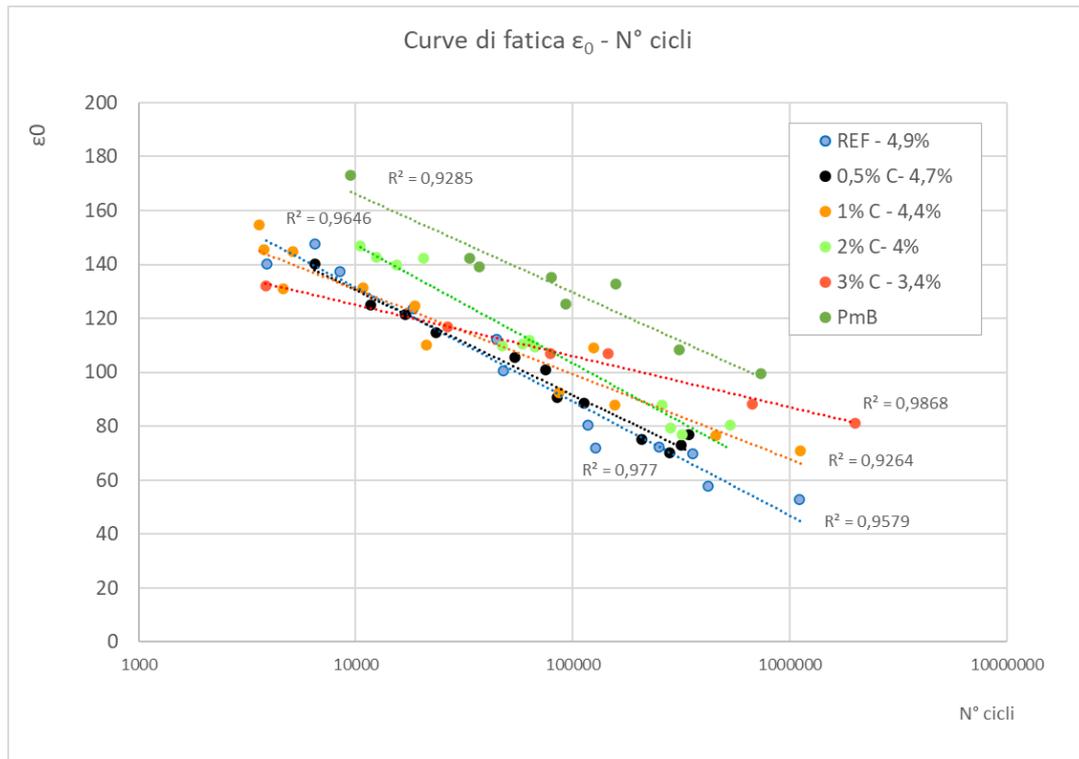


Fig.4.9 - Curve di fatica ϵ_0 - N° cicli con aggiunto binder con bitume modificato hard

Dalla figura si rileva facilmente che, in termini di deformazione iniziale, il conglomerato bituminoso con bitume modificato hard ha un comportamento a fatica nettamente superiore alle miscele con le plastiche pellettizzate.

5 CONCLUSIONI

La presente sperimentazione è stata eseguita proprio con l'obiettivo di valutare l'effettiva possibilità di riutilizzo delle plastiche da Rifiuti Solidi Urbani (RSU) all'interno del conglomerato bituminoso così da fare in modo che esse non costituiscano solamente un rifiuto ed eseguendo una analisi prestazionale delle miscele ottenute, studiandone le proprietà volumetriche, meccaniche e comportamentali.

Questa è la terza di tre fasi. In particolare, la prima si è focalizzata nell'analisi preliminare della composizione delle miscele da realizzare, la seconda nel confezionamento e valutazione delle caratteristiche volumetriche, meccaniche e prestazionali di conglomerati bituminosi confezionati con dosaggi di 0,5% e 2% di plastiche pellettizzate, ed infine la terza sono stati testati altri due differenti dosaggi delle stesse plastiche pari al 1% e 3%.

Nella fase 2 e nella fase 3 della sperimentazione sulle possibilità di utilizzo della plastica di recupero da RSU nei conglomerati bituminosi per pavimentazioni stradali sono state poste a confronto quindi 4 miscele con 4 diversi dosaggi di plastiche pellettizzate con un conglomerato dello stesso tipo (binder) senza plastiche.

Sulla base dei risultati ottenuti si possono trarre le seguenti conclusioni:

- l'impiego delle plastiche consente una sensibile riduzione del dosaggio del bitume a parità di caratteristiche volumetriche del conglomerato bituminoso;
- l'inserimento delle plastiche pellettizzate fa aumentare notevolmente il Modulo di Rigidezza a Trazione Indiretta;
- aumentando la percentuale di plastiche, aumenta la Resistenza a rottura per Trazione Indiretta, restando nei limiti previsti dal Capitolato ANAS per i conglomerati bituminosi con bitume modificato hard con dosaggi fino al 2%; con il 3% di plastiche viene superato, seppur di poco, il limite superiore di conformità;
- il CT-index diminuisce notevolmente con l'inserimento e con il dosaggio delle plastiche, indicando un forte incremento della fragilità del conglomerato bituminoso;
- nelle prove a cicli di carico ripetuti il conglomerato con i dosaggi più alti di plastiche ha un comportamento a fatica sensibilmente migliore del conglomerato senza plastiche con bitume normale, ma inferiore ad un conglomerato confezionato con bitume modificato hard.

I risultati della sperimentazione, però, non devono essere considerati come punti di arrivo, poiché, per questo tipo di applicazione sperimentale, circa l'utilizzo delle plastiche da RSU all'interno di conglomerati bituminosi, non esistono dati scientifici certi. Siamo di fronte, infatti ad un materiale che, se opportunamente dosato, anche in relazione alle altre componenti della miscela, potrebbe essere adatto a rivestire un ruolo importante all'interno del pacchetto stradale. Sono tuttora in atto, presso l'Università Politecnica delle Marche di Ancona, differenti sperimentazioni che hanno come obiettivo generale quello di definire le caratteristiche specifiche di un prodotto che possa essere utilizzato in opera negli strati delle pavimentazioni, garantendo determinati standard prestazionali e allo stesso tempo consentendo il riciclaggio, il recupero ed il riutilizzo di materiali altrimenti destinati a discarica come le plastiche da RSU. Alla luce delle problematiche riscontrate nel perseguire questo intento, un loro possibile recupero come materia prima seconda in taluni strati delle pavimentazioni stradali si configurerebbe come un passo importante verso l'intento comune

a livello europeo di ridurre le quantità avviate a discarica, già molto elevate.

I centri di ricerca universitari, le società autostradali, gli enti pubblici e le organizzazioni private hanno completato o stanno conducendo indagini sperimentali riguardanti la conformità, la sostenibilità ambientale e le prestazioni per l'impiego di prodotti di riciclo nelle costruzioni stradali.

La valenza del riciclaggio dei prodotti di scarto come la plastica, quindi, è duplice: in termini economici è possibile disporre di materiali generalmente meno costosi di quelli vergini, come il bitume, e con caratteristiche e prestazioni in opera più che soddisfacenti;

in termini ambientali, il loro riutilizzo non ne richiede il conferimento in discarica, eliminando i problemi ad essa annessi, e consentendo l'importante risparmio di risorse nell'ottica della sostenibilità.

6 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Materiale didattico fornito dal relatore
- https://it.wikipedia.org/wiki/Riciclaggio_dei_rifiuti
- Plastic Europe, “An analysis of European plastics production, demand and waste data”, 2020.
- D. Ticali, T. Giuffrè, A. Messineo, “Il riutilizzo delle plastiche provenienti dalla raccolta differenziata di R.S.U. nella tecnica delle costruzioni stradali”, 2007
- S.Rajasekaran, Dr. R. Vasudevan, Dr. Samuvel Paulraj, American Journal of Engineering Research (AJER), “Reuse of Waste Plastics Coated Aggregates-Bitumen Mix Composite For Road Application – Green Method”, 2013
- Md. Shahnawaz et al, Springer Nature Singapore, “Plastic Waste Disposal and Reuse of Plastic Waste”, 2019
- Chow C., So W., Yeung S., “Plastic Waste Problem and Education for Plastic Waste Management”, February 2017
- Narancic and O’Connor, Microbiology, “Plastic waste as a global challenge: are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem?”, 2019
- <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy>
- <http://www.vallizabban.com>
- <http://modofluido.hydac.it>
- Rassegna del bitume- SITEBSi srl – estr. dal n° 31/98
- <http://www.wikistones.it/blog/2017/02/gli-aggregati-inerti>
- <https://www.greenplanetnews.it/inquinamento-da-plastica-un-grande-problema-da-risolvere>
- <https://formiche.net/2021/03/inquinamento-plastica-studio-usa-paesi-sviluppo>
- <https://anteritalia.org/inquinamento-plastica-mare-cause-conseguenze-soluzioni>
- <http://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2021/234-21/pavimentazioni-stradali-e-transizione-ecologica>
- <https://www.rinnovabili.it/ambiente/riciclo-strada>
- <https://www.stradeeautostrade.it/asfalti-e-bitumi/la-caratterizzazione-sperimentale-di-conglomerati-bituminosi>
- <https://www.superbeton.it/ecms/Mix-design>
- Felice A. Santagata, “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali”, Pearson. vol. 1 e vol.2
- UNI EN 12697-31, Preparazione del provino con pressa giratoria, 2019
- UNI EN 12697-10, Compattabilità, 2019
- UNI EN 12697-5, Determinazione della massa volumica massima, 2018
- UNI EN 12697-6, Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi, 2012;
- UNI EN 12697-8, Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi, 2019
- UNI EN 12697-26 – Rigidezza, 2018
- UNI EN 12697-23, Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi, 2018
- UNI EN 12697-24, Resistenza alla fatica, 2018.