



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA
(DICEA)**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**Caratterizzazione meccanica di miscele bituminose per strati di binder
contenenti filler di recupero da circuiti stampati**

**Mechanical characterization of bituminous mixtures for binder courses
containing recycled filler from printed circuit boards**

Relatrice:

Prof.ssa **Gilda Ferrotti**

Tesi di Laurea di:

Matteo Straccio

Correlatori:

Prof. **Fabrizio Cardone**

Ing. **Valentina Scaramucci**

Anno Accademico 2025/2026

SOMMARIO

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1 – STATO DELL'ARTE

1.1 – Le pavimentazioni stradali

1.2 – Le pavimentazioni flessibili

1.3 – Sostenibilità ambientale

1.4 – I circuiti stampati (PCB)

1.5 – Il processo di riciclo dei PCB

1.6 – Approccio sostenibile nel conglomerato bituminoso

1.6.1 – Wet process

1.6.2 – Dry process

CAPITOLO 2 - MATERIALI

2.1 – Aggregati di riciclo RAP 0/8

2.2 – Aggregati vergini

2.2.1 – Sabbia 0/4

2.2.2 – Pietrisco 7/12

2.2.3 – Pietrisco 12/20

2.2.4 - Filler

2.3 – Bitume

2.3.1 – L'ossidazione del bitume

2.3.2 – Bitume stradale 50/70

2.4 – Materiale di recupero da circuiti stampati

2.5 – Conglomerato bituminoso

2.6 – Curva granulometrica di progetto

CAPITOLO 3 – PROGRAMMA SPERIMENTALE

3.1 – Finalità della sperimentazione

3.2 – Apparecchiature e protocolli di prova

3.2.1 – Analisi granulometrica degli aggregati

3.2.2 – Determinazione della massa volumica del materiale di recupero

3.2.3 – Determinazione della massa volumica massima delle miscele

3.2.3.1 – Procedimento volumetrico

3.2.3.2 – Procedimento matematico

3.2.4 – Mix design

3.2.5 – Miscelazione

3.2.6 – Determinazione della massa dei provini per la compattazione

3.2.7 – Compattazione e confezionamento dei provini

3.3 – Determinazione delle proprietà volumetriche

3.3.1 – Determinazione della massa volumica apparente dei provini

3.3.1.1 – Procedimento dry

3.3.1.2 – Procedimento geometrico

3.3.1.3 – Procedimento SSD (superficie satura asciutta)

3.4 – Determinazione del volume dei vuoti

3.5 – Determinazione della compattabilità

3.6 – Condizionamento dei provini

3.6.1 – Condizionamento wet

3.6.2 – Condizionamento dry

3.7 – Prova di rottura a trazione indiretta

3.7.1 – Coefficiente di trazione indiretta (CTI)

3.7.2 – Suscettibilità all'acqua

CAPITOLO 4 – ANALISI DEI RISULTATI

4.1 – Studio della compattabilità

4.1.1 – Analisi dei vuoti dei provini COMP

4.1.2 – Analisi del CEI dei provini COMP

4.1.3 – Analisi dei vuoti dei provini ITS

4.1.4 – Analisi dei vuoti dei provini ITSR

4.1.5 – Confronto dei vuoti tra i provini COMP e ITS

4.2 – Resistenza a trazione indiretta (ITS)

4.2.1 – Analisi ITS

4.2.2 – Analisi del CTI

4.2.3 – Provini ITSR e confronto tra le miscele

4.3 – Suscettibilità all'acqua (ITSR) e confronto tra le miscele

CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI

RIFERIMENTI

INTRODUZIONE

L'efficienza del sistema infrastrutturale incide in maniera determinante sullo sviluppo economico-sociale e sulla qualità di un territorio. In tal senso, ancora oggi la mobilità su gomma rappresenta la modalità di spostamento più utilizzata per la movimentazione di merci e persone su scala nazionale, regionale e urbana. Tuttavia, nel corso del tempo, il concetto di infrastruttura e la sua relativa manutenzione hanno subito una significativa evoluzione, dovuta sia alle trasformazioni dei sistemi di trasporto, in termini di entità e carichi, sia all'introduzione di nuove tecnologie costruttive e strumenti gestionali. In particolare, la rete viaria nazionale ha vissuto un'importante espansione negli ultimi decenni, in concomitanza con l'accelerazione dello sviluppo economico dell'intero Paese. Considerando uno dei punti riguardanti la sostenibilità ambientale del Nuovo Piano d'Azione votato dal Parlamento Europeo, il quale prevede un'economia circolare dove i materiali dismessi vengano reintrodotti nel ciclo produttivo e non semplicemente smaltiti in discariche, la presente attività di ricerca sperimentale indaga un tema innovativo riguardo il campo stradale, ovvero l'impiego di materiale di recupero proveniente da circuiti stampati a fine vita all'interno delle miscele per la produzione di conglomerato bituminoso. Infatti, oggi, il tema del riciclo e della sostenibilità ambientale sta diventando di interesse sempre più crescente e per questo motivo si studiano, in ogni ambito, valide alternative di riciclo di materiali potenzialmente dannosi e di difficile smaltimento. Proprio in merito a queste considerazioni, il Parlamento Europeo si è posto come obiettivo il raggiungimento di un'economia a zero emissioni di carbonio, sostenibile dal punto di vista ambientale e completamente circolare entro il 2050.

L'obiettivo di tale sperimentazione diviene perciò quello di studiare, attraverso il mix design volumetrico, la possibile applicazione di materiale di recupero proveniente da circuiti stampati (PCB), inserito all'interno della miscela di conglomerato bituminoso secondo diverse percentuali, cercando di valutare vantaggi, svantaggi ed eventuali difficoltà operative nel confezionamento e nel loro impiego pratico. Al fine di analizzare gli effetti di questa applicazione, la caratterizzazione fisico-meccanica del conglomerato è stata effettuata attraverso le seguenti prove, ovvero: la valutazione della compattabilità (vuoti residui e CEI), la prova di rottura a trazione indiretta (ITS), il calcolo del coefficiente di trazione indiretta (CTI) e la suscettibilità all'acqua (ITSR). Il lavoro realizzato è rendicontato in cinque capitoli. Nel primo capitolo si analizzano le caratteristiche dei PCB, quale materiale di recupero, e i processi di inserimento dello stesso all'interno della miscela di conglomerato bituminoso. Nel secondo capitolo si descrivono i materiali utilizzati per la sperimentazione e per il confezionamento delle miscele oggetto di studio, da cui è stata ricavata la curva granulometrica impiegata per la miscelazione. Il terzo capitolo tratta invece il programma sperimentale, condotto presso il

Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile e Architettura” dell’Università Politecnica delle Marche, e si illustrano le miscele di progetto, le procedure di laboratorio e il confezionamento dei provini ottenuti. Nel quarto e ultimo capitolo si analizzano i risultati delle prove effettuate, i quali sono stati poi registrati in tabelle e grafici, di cui sono riportate anche le immagini con relativa didascalia, con lo scopo di ottenere una chiara e immediata lettura dei valori ottenuti.

CAPITOLO 1 – STATO DELL'ARTE

1.1 - Le pavimentazioni stradali

Come riporta la definizione di “strada” presente nell’Enciclopedia Treccani, per i Romani e, più in generale, nella lingua latina, il termine indicava una distesa di lastricato. Nel linguaggio comune, esso viene spesso utilizzato come sinonimo di “via”. Un Ingegnere invece, intende la “strada” come un’infrastruttura complessa, pensata per permettere la circolazione e la mobilità di veicoli, merci, persone e animali in modo sicuro, efficiente e duraturo. È una struttura lineare e, allo stesso tempo, un sistema di elementi funzionali che devono soddisfare differenti requisiti, come: mobilità, capacità di carico, durabilità, economicità e comfort di marcia.

In uno dei suoi interventi, Stefano Ravaioli – ingegnere civile e direttore generale della rivista *Rassegna del Bitume* – paragona la struttura di una strada in asfalto a quella di un edificio monodimensionale a sviluppo longitudinale. Secondo questa analogia, la pavimentazione è costituita da una copertura superiore (ovvero il tappeto d'usura), da una sequenza di piani in elevazione (cioè lo strato di binder e lo strato di base della sovrastruttura) e, infine, da una platea d'appoggio (che corrisponderebbe alla fondazione) [1]. Una buona realizzazione di tali componenti garantisce la stabilità e la durabilità dell'opera nel tempo; al contrario, la presenza di discontinuità o fessurazioni nello strato superficiale permetterebbe l'infiltrazione e il percolamento delle acque piovane nei livelli inferiori, che provocherebbero il progressivo degrado strutturale dell'intera sezione. Analogamente, il cedimento della fondazione determinerebbe il collasso dell'intero edificio. Questo medesimo comportamento si riscontra nell'infrastruttura viaria, assumendo caratteri di particolare criticità nell'ambito urbano. Infatti, le strade urbane risultano quasi sempre prive di una vera e propria fondazione strutturale, sono costantemente attraversate negli strati intermedi da reti di tubazioni di ogni genere e sono sottoposte a sollecitazioni dinamiche continue, dovute a carichi di traffico inadeguati ed eccessivi.

Secondo il Quaderno Tecnico Anas (*vol. V, Cap. II*) [2], la pavimentazione stradale, anche detta “sovrastruttura”, è la parte più superficiale del corpo stradale ed è direttamente interessata dal passaggio dei veicoli. È costituita da un insieme di strati di materiali e spessori diversi, sovrapposti l’uno all’altro. I requisiti prestazionali primari di una sovrastruttura stradale si articolano in due macrocategorie fondamentali: i requisiti strutturali e quelli funzionali. Sotto il profilo strutturale, l’opera deve essere in grado di assorbire le sollecitazioni statiche e dinamiche indotte dai carichi veicolari e dalle azioni ambientali, provvedendo alla corretta ripartizione e trasmissione delle tensioni al piano di sottofondo, così da preservare l'integrità del corpo stradale. Dal punto di vista funzionale, la pavimentazione deve garantire elevati standard di

sicurezza e comfort di marcia per l'utenza, ottimizzando le caratteristiche superficiali in termini di aderenza e regolarità geometrica.

1.2 – Le pavimentazioni flessibili

Stando alle informazioni riportate nel Quaderno Tecnico Anas (*vol. V, Cap. III*) [2], la principale classificazione suddivide le pavimentazioni in rigide, semi-rigide e flessibili. Nel presente elaborato vengono esaminate, principalmente, le pavimentazioni flessibili. La caratteristica che accomuna le pavimentazioni semi-rigide e quelle flessibili risiede nella presenza di conglomerato bituminoso, il quale viene impiegato per il confezionamento degli strati legati del pacchetto strutturale (i.e. base, binder, usura). Essi poggiano sullo strato di fondazione, che a sua volta ripartisce i carichi verso il terreno di appoggio (sottofondo). A tal proposito, occorre ricordare che nel progetto del pacchetto strutturale è fondamentale considerare le caratteristiche del sottofondo.

Come si deduce dall'immagine sottostante (Figura 1.1), una sovrastruttura flessibile è composta dai seguenti strati: strato di base, binder e tappeto d'usura. Lo strato di base svolge la funzione strutturale di ripartizione dei carichi, il binder quella di collegamento tra base e usura, mentre il tappeto d'usura conferisce regolarità e aderenza della pavimentazione. Il materiale principalmente utilizzato per la costruzione dei suddetti strati è il conglomerato bituminoso, il quale è costituito dai seguenti materiali: aggregati (vergini o riciclati), filler, legante bituminoso ed eventuali additivi. Solitamente, i materiali di recupero vengono impiegati nella realizzazione di strati di base e binder, raramente per il tappeto d'usura. Infatti, in questa sperimentazione sono stati osservati gli effetti dell'utilizzo di materiale di recupero, proveniente dai circuiti stampati, proprio per la produzione dello strato di binder.

STRATO	FUNZIONE	MATERIALI
USURA	REGOLARITÀ E ADERENZA	CONGLOMERATO BITUMINOSO
BINDER	COLLEGAMENTO	CONGLOMERATO BITUMINOSO
BASE	STRUTTURALE RIPARTIZIONE DEI CARICHI	CONGL. BITUMINOSO MISTI CEMENTATI
FONDAZIONE	TRASMISSIONE DEI CARICHI AL SOTTOFONDO	MISTI GRANULARI TERRE STABILIZZATE
SOTTOFONDO	ASSORBIMENTO E DISSIPAZIONE DEI CARICHI	TERRE STABILIZZATE

Figura 1.1 – *Stratificazione della pavimentazione, funzione e materiali* [2]

1.3 – Sostenibilità ambientale

Nel contesto attuale, caratterizzato da una rapida evoluzione tecnologica e da una crescente diffusione di dispositivi elettronici, la gestione dei rifiuti che derivano da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) rappresenta una delle principali sfide ambientali e industriali. Infatti, al crescere della domanda di prodotti elettronici, crescono sia la produzione, sia la necessità di smaltire i prodotti dismessi, una volta giunti al termine del loro utilizzo. Ne consegue l'urgenza di ricercare e adottare soluzioni di smaltimento sostenibili, finalizzate a recuperare e valorizzare, almeno in parte, il materiale di scarto.

La presente attività di ricerca si inserisce nel più ampio contesto delle strategie volte alla promozione di uno sviluppo economico sostenibile, orientato alla conservazione delle risorse naturali e alla riduzione degli impatti ambientali associati ai processi produttivi tradizionali. In tale prospettiva, assume un ruolo fondamentale l'adozione di pratiche che favoriscano il recupero e il riutilizzo dei materiali, considerati come risorse da valorizzare e non come rifiuti destinati al mero smaltimento in discarica.

Tramite due distinti decreti ministeriali pubblicati nella Gazzetta Ufficiale, il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) [3], in ambito infrastrutturale e, in particolare, nel settore delle pavimentazioni stradali, introduce il concetto dei Criteri Ambientali Minimi (CAM), finalizzati al raggiungimento degli obiettivi nazionali di sviluppo sostenibile. Infatti, i CAM promuovono l'integrazione degli aspetti ambientali nei processi di progettazione, realizzazione e manutenzione delle infrastrutture, attraverso una valutazione basata sul ciclo di vita dei prodotti, favorendo la realizzazione di opere affidabili, resilienti e caratterizzate da un ridotto impatto ambientale. È in questo contesto che si colloca l'interesse crescente verso l'impiego di materiali plastici riciclati all'interno dei conglomerati bituminosi. Infatti, tale soluzione rappresenta una possibile risposta alla problematica della gestione dei rifiuti plastici, il cui smaltimento costituisce attualmente una delle principali sfide ambientali a livello globale. Attraverso il recupero e il riutilizzo dei rifiuti è possibile: ridurre il consumo di materie prime vergini, limitare la domanda energetica dei processi produttivi e diminuire le emissioni di gas (causa dell'effetto serra) associate alla produzione di nuovi materiali. Inoltre, il riutilizzo diretto dei materiali rappresenta una delle strategie più efficaci in termini di riduzione degli impatti ambientali e dei costi connessi alla gestione dei rifiuti.

Secondo quanto riportato dalla Commissione Europea, è opportuno precisare che per “riciclo” si intende l'insieme delle operazioni finalizzate al recupero di materiali dai rifiuti, affinché possano essere reimpiegati in nuovi processi produttivi. Tale pratica consente di migliorare la sostenibilità dell'intero ciclo di vita dei materiali, riducendo il ricorso alle discariche e agli

impianti di incenerimento, che rimangono comunque necessari per la gestione delle frazioni invece non recuperabili. I materiali riciclabili comprendono numerose categorie di rifiuti, tra cui vetro, carta, legno, tessuti e materiali plastici, i quali possono essere trasformati in nuovi prodotti o utilizzati come materie prime secondarie. Precisamente, a febbraio 2021, il Parlamento Europeo, si è posto come obiettivo, entro il 2050, un'economia caratterizzata dall'assenza di emissioni di carbonio, sostenibile dal punto di vista ambientale, libera dalle sostanze tossiche e completamente circolare.

Nel mese di marzo 2020 la Commissione Europea ha presentato un nuovo Piano d'Azione per l'Economia Circolare (PAEC) [4], che inserisce tra le sue priorità fondamentali la riduzione dei rifiuti elettronici ed elettrici. La proposta definisce specificamente obiettivi immediati, quali il “diritto alla riparazione” e il miglioramento del riutilizzo in senso generale, l'introduzione di un caricabatterie universale per tutti i dispositivi elettronici e l'istituzione di un sistema di premi per incoraggiare il riciclo dei prodotti di elettronica. Inoltre, l'UE ha adottato norme sulla raccolta, il trattamento e il riciclaggio delle apparecchiature elettriche ed elettroniche giunte a fine vita, con l'obiettivo di affrontare il problema dell'aumento dei rifiuti elettronici.

Tuttavia, la valutazione dell'effettiva sostenibilità delle soluzioni progettuali richiede l'impiego di strumenti analitici in grado di quantificare gli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita. Tra questi, il metodo del *Life Cycle Assessment* (LCA), o Valutazione del Ciclo di Vita [5], rappresenta uno degli strumenti più consolidati e diffusi a livello mondiale. L'LCA è una metodologia standardizzata, a livello internazionale dagli standard ISO 14040 e ISO 14044, che consente di analizzare e quantificare gli impatti ambientali associati a un prodotto, processo o servizio durante tutte le fasi del suo ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino alla dismissione finale. Tuttavia, l'applicazione dell'LCA può risultare complessa e onerosa, sia dal punto di vista economico, sia in termini di tempo, in quanto richiede la raccolta e l'elaborazione di un'elevata quantità di dati relativi a ciascuna fase del ciclo di vita analizzato.

Nell'ambito delle politiche nazionali di sostenibilità ambientale, come riportato dal Capitolato Anas [5], il CAM Strade definisce i requisiti ambientali per la progettazione, costruzione, manutenzione e l'adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali. In particolare, a partire dal 23 agosto 2024, è stato pubblicato in Gazzetta Ufficiale il D.M. del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) che definisce i CAM per la progettazione e realizzazione di lavori di costruzione, la manutenzione e l'adeguamento funzionale delle infrastrutture stradali, entrati in vigore dal 21 dicembre 2024. Infatti, secondo i nuovi CAM, tutte le stazioni appaltanti sono obbligate a seguire stringenti criteri di produzione, finalizzati a ridurre l'impatto ambientale dei progetti infrastrutturali. La novità principale in merito alle pavimentazioni stradali riguarda l'aumento delle percentuali di fresato nella sovrastruttura stradale, la

valutazione delle prestazioni acustiche e l'abbassamento delle temperature di confezionamento e stesa della miscela. Proprio per queste ragioni, i CAM sono divenuti un tema di profondo interesse e di dibattito quotidiano, per tutte le imprese e le Pubbliche Amministrazioni interessate.

1.4 – I circuiti stampati (PCB)

L'ingegnere elettronico, esperto di progettazione di circuiti stampati (PCB, dall'acronimo *Printed Circuit Boards*) e divulgatore scientifico Zachariah Peterson definisce i PCB “un assieme elettronico che utilizza conduttori di rame per creare connessioni elettriche tra i componenti” [6].

I PCB più comuni sono quelli assemblati su substrati rigidi, ma esistono anche altri tipi di circuiti stampati, elencati qui di seguito:

- **Monofaccia:** i cui componenti sono montati su una singola superficie;
- **A doppia faccia:** i cui componenti sono montati su entrambe le superfici;
- **Multistrato:** questo tipo di circuiti può essere sia a monofaccia che a doppia faccia e il passaggio di segnali elettrici avviene grazie agli strati interni;
- **PCB rigidi:** circuiti fabbricati e assemblati su un materiale laminato rigido;
- **PCB rigido-flessibili:** è possibile utilizzare questi circuiti nei progetti che richiedono elementi mobili;
- **PCB flessibili:** questi circuiti non utilizzano materiali rigidi e possono avere componenti montati e saldati;
- **PCB con anima in metallo:** circuiti spesso utilizzati nell'ambito dell'illuminazione ad alta potenza;
- **PCB in ceramica:** circuiti molto poco comuni, dove vi è una grande dissipazione di calore e, per questo, sono impiegati quando è necessario avere un'elevata conduttività termica.

Ad ogni modo, qualunque sia la tipologia di circuito stampato, esso rappresenta la componente fondamentale dei dispositivi elettronici, svolgendo la duplice funzione di supporto meccanico e di collegamento elettrico, mediante piste conduttive in rame. Nella Figura 1.2 riportata di seguito, si illustra un esempio di scheda di un circuito stampato. Recentemente, i PCB hanno suscitato un crescente interesse nel settore dell'ingegneria civile, in un'ottica di recupero e valorizzazione dei materiali che li compongono. All'espansione del mercato tecnologico, consegue un diretto e progressivo aumento delle quantità di PCB giunti a fine vita e destinati allo smaltimento. Secondo le stime più recenti, la produzione mondiale di rifiuti elettronici

(RAEE) ammonta a diverse decine di milioni di tonnellate all'anno e questo dato è destinato a crescere, con tassi costanti che evidenziano la necessità di sviluppare soluzioni efficaci per la gestione dello smaltimento di tali materiali (fonti ONU) [7]. In questo scenario, i PCB costituiscono circa il 3% in massa dei RAEE totali e rappresentano quindi una delle frazioni con i tassi di crescita più elevati (secondo il Rapporto RAEE). L'interesse scientifico e industriale verso il riciclo dei PCB è dovuto principalmente dalla loro composizione chimica. Infatti, come riportato da Xingyu Zhao et al. [8], i PCB sono composti da una frazione metallica e una non metallica. La componente metallica, ovvero il 30% della massa complessiva della scheda, è costituita prevalentemente da rame (con concentrazioni fino al 25% in peso), oltre che da metalli di base (stagno, piombo, zinco) e metalli preziosi ad alto valore economico (oro, argento e palladio). La frazione non metallica è invece composta da resine termoindurenti e materiali fibrosi, impiegati in origine come substrato isolante e strutturale. Questi elementi sono facilmente recuperabili e ciò rende i PCB “di scarto” un’interessante possibile risorsa secondaria nell’ottica dell'economia circolare. Ne consegue un orientamento della ricerca verso lo sviluppo di processi innovativi e soprattutto sostenibili, per il recupero di tali frazioni, con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale dei RAEE e limitare il consumo di risorse naturali non rinnovabili.

Tra le possibilità di impiego di questi materiali di recupero, come riportato sempre da Xingyu Zhao et al. [8], nello studio di fattibilità si evidenzia i meccanismi chimico-fisici attraverso cui l'integrazione delle NMF-WPCB (*Non-Metallic Fractions - Waste Printed Circuit Boards*) nei materiali edilizi potrebbe ottimizzarne le proprietà complessive. Nello specifico, l'introduzione di tali frazioni favorisce l'accelerazione delle reazioni chimiche, l'incremento della densità microstrutturale e la mitigazione della propagazione fessurativa. Al fine di validarne l'effettiva applicabilità sul campo, l'indagine ne esamina la lavorabilità, la sostenibilità economica, la durabilità e la tossicità. I riscontri sperimentali indicano che l'impiego delle NMF-WPCB conferisce maggiore resistenza e durabilità alle matrici cementizie organiche; parallelamente, nei sistemi inorganici, si osservano migliori prestazioni in ambito stradale e una minore sensibilità nei confronti dei processi di invecchiamento. Nel quadro delle attuali politiche globali di sostenibilità ambientale, lo sviluppo di materiali da costruzione basati su NMF-WPCB genera molteplici benefici che interessano la sfera ambientale, economica e industriale. Dunque, questa tecnologia rappresenta una risposta concreta alle attuali e future sfide ecologiche, assumendo un ruolo strategico per l'evoluzione dell'ingegneria civile sostenibile.

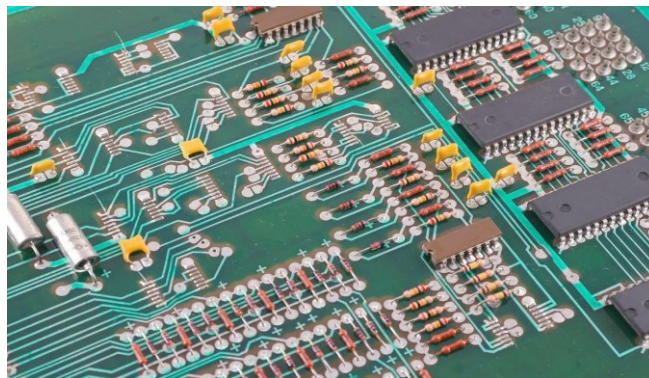


Figura 1.2 – Scheda di un circuito stampato (PCB)

1.5 – Il processo di riciclo dei PCB

Nell'ambito della gestione dei rifiuti elettronici (RAEE), la strategia più avanzata proposta dalla Commissione Europea è l'implementazione di un sistema a ciclo chiuso, che prevede il recupero e la reintroduzione dei materiali componenti i PCB all'interno dei processi produttivi di riciclo. Una volta decretato il fine vita di un dispositivo, il circuito stampato contenuto viene sottoposto a un trattamento diviso in tre fasi, finalizzate a recuperare le diverse frazioni costitutive di cui sopra (cfr. §1.4). Come evidenziato dall'Ingegnere Progettista Elettronico Alex Chen [9], innanzitutto, come prima fase, vengono rimossi i componenti e le sostanze potenzialmente pericolose, legate specialmente ai residui non metallici, a cui sono legate numerose criticità. Successivamente, si procede con la macinazione dell'intera scheda, da cui si ottiene una miscela eterogenea composta da particelle metalliche, fibre di vetro e matrici polimeriche. L'ultima fase prevede la separazione e il recupero dei residui metallici presenti, quali rame, oro, argento e altri elementi riutilizzabili.

Nonostante l'elevata efficienza raggiunta nello sviluppo di tecniche di recupero di materiali di scarto, numerose sono ancora le criticità legate al trattamento dei residui non metallici. Questi scarti, costituiti prevalentemente da resine epossidiche e fibre di vetro, subiscono un'alterazione delle proprietà fisico-chimiche durante le fasi di lavorazione ed è proprio qui che risiede la limitazione legata a un eventuale riutilizzo diretto nella produzione di nuovi PCB o di altri manufatti industriali. L'impatto ambientale dello smaltimento dei PCB dipende dal metodo adottato. Le maggiori criticità sono legate ai metodi tradizionali, quali l'incenerimento, ossia la combustione delle resine polimeriche, la quale genera emissioni di sostanze tossiche nocive per la salute e per gli ecosistemi, e il conferimento in discarica, il quale comporta il rischio di lisciviazione nel suolo e nelle falde acquifere di elementi pericolosi, quali metalli pesanti e composti bromurati. È logico dedurre che sia opportuno gestire i materiali di scarto appellandosi

a strategie di gestione dei rifiuti elettronici più all'avanguardia, le quali seguono un modello di economia circolare (a ciclo chiuso), secondo cui i materiali recuperati vengano reintrodotti nel processo produttivo di fabbricazione di nuovi circuiti stampati (o di altri prodotti industriali). In tal modo, si recuperano e si valorizzano le materie prime di elevato valore economico provenienti dai PCB. Nella figura 1.3 sottostante si mostra un tipico processo di riciclo dei PCB.

Secondo quanto riportato sempre da Alex Chen [9], le tipologie di circuiti stampati che si possono riciclare sono: PCB a strato singolo, a doppia faccia, multistrato, rigidi, flessibili e con supporto in alluminio. Le cui caratteristiche principali vengono riportate sopra. Inoltre, di particolare interesse risultano i materiali preziosi che si possono riciclare dai circuiti stampati. Sicuramente il rame rappresenta l'aliquota maggiore e più rilevante, estratto da diverse parti del PCB come i bordi e la soluzione di incisione, rappresenta un materiale prezioso e altamente riciclabile. Non da meno l'ossido di rame, sottoprodotto generato durante il trattamento dei fanghi, può anch'esso essere recuperato. Lo stagno, solitamente presente nella saldatura, ricavato attraverso un livellamento ad aria calda. Infine, i PCB contengono anche metalli preziosi (oro e argento), i quali possono essere estratti e venduti. Restando sempre in tema di riciclaggio, Chen analizza anche le problematiche riguardanti i siti dove riciclare i circuiti stampati. Considerato un tema di crescente dibattito, oggi infatti esistono centri locali di raccolta dei rifiuti elettronici RAEE, allo stesso modo questo può avvenire anche mediante aziende specializzate nel riciclaggio. Restano una valida alternativa anche i rivenditori di elettronica, aziende private e piattaforme online.



Figura 1.3 – Processo di riciclo di un PCB

1.6 - Approccio sostenibile nel conglomerato bituminoso

Negli ultimi anni, il recupero delle frazioni metalliche ad alto valore aggiunto dai circuiti stampati a fine vita ha registrato significativi progressi tecnologici, spinti dal crescente interesse verso soluzioni alternative più efficienti e sostenibili, rispetto ai tradizionali processi idrometallurgici (§1.5). Come evidenziato da Becci et al. [10], le strategie bio-idrometallurgiche stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante grazie alla loro capacità di abbattere sia l'impatto ambientale, sia i costi operativi. Tuttavia, nonostante tali vantaggi, quest'ultime presentano ancora limitazioni connesse alla ridotta capacità di trattamento dei rifiuti e alle difficoltà di trasferimento dei processi dal laboratorio alla scala industriale. Per superare tali criticità operative, il presente studio propone un innovativo processo di bio-lisciviazione batterica, basato su una configurazione a due stadi. Questo approccio consente di minimizzare gli effetti tossici esercitati dai metalli sul metabolismo microbico, permettendo di trattare concentrazioni di PCB fino al 5% (p/v) e garantendo, al contempo, elevate efficienze di estrazione. I campioni utilizzati nella sperimentazione, caratterizzati da un elevato contenuto metallico e provenienti prevalentemente da personal computer, sono stati forniti dall'Università degli Studi dell'Aquila. La preparazione del materiale ha previsto una procedura preliminare di disassemblaggio manuale, per la rimozione dei principali componenti elettronici (quali condensatori, batterie e resistori), seguita da una frammentazione meccanica mediante lame in acciaio inox e pinze. Il materiale ottenuto è stato successivamente macinato fino al raggiungimento di una granulometria inferiore a 0,5 mm, utilizzata in tutte le prove sperimentali di bio-lisciviazione. Infine, è stato eseguito un trattamento di lavaggio con una soluzione satura di cloruro di sodio (NaCl), finalizzata a rimuovere le frazioni plastiche potenzialmente tossiche per l'attività batterica; tale operazione ha consentito di migliorare significativamente l'efficienza del processo di estrazione dei metalli.

In parallelo al recupero delle componenti metalliche, nello studio proposto da Yongjun Meng et al. [11], particolare interesse è rivolto alla valorizzazione efficace delle frazioni non metalliche (*Non-Metallic Fractions, NMF*), che rappresentano circa il 70% in peso dei PCB dismessi. Essendo composte principalmente da fibre di vetro, resine epossidiche reticolate e altre impurità, alle NMF sono legate le principali criticità ambientali e di smaltimento. Sebbene il loro recupero sia fondamentale nell'ottica dell'economia circolare, le tecnologie di riciclo dedicate sono ancora poco sviluppate e rimangono oggetto di una ricerca scientifica in continua evoluzione.

Sempre in merito alla stessa ricerca, ad oggi, le principali applicazioni delle NMF riguardano il loro impiego come materiali di riempimento (filler) in diversi settori industriali. In particolare,

nel campo delle infrastrutture stradali, gli studi hanno esaminato la possibilità di utilizzare tali frazioni di materiali di recupero all'interno delle miscele bituminose secondo due metodologie differenti: il processo a umido (*wet process*) e il processo a secco (*dry process*). Si descrivono di seguito le caratteristiche di entrambi.

1.6.1 - Wet process

Il *wet process* prevede che tali frazioni di materiali di recupero vengano impiegate come agenti modificanti del legante bituminoso, miscelandole con il bitume vergine a temperature controllate e secondo tempi prestabiliti, tramite sistemi di agitazione meccanica. Si ottiene così un legante modificato e omogeneo. Tra gli studi condotti con questa procedura, un'analisi disponibile in letteratura è quella di Yongjun Meng et al. [11], i quali hanno investigato l'uso di PCB in combinazione con la gomma stirene-butadiene (SBR). Le analisi eseguite tramite reometro a taglio dinamico (DSR) hanno evidenziato che l'introduzione di PCB determina un incremento del modulo elastico di recupero, del modulo complesso di taglio e della resistenza all'ormaiamento ad alte temperature. Sulle miscele bituminose, il dosaggio ottimale ha mostrato un aumento significativo della resistenza alla deformazione permanente e della stabilità all'acqua, a fronte di una riduzione della resistenza alla fessurazione alle basse temperature che è risultata comunque conforme ai requisiti ingegneristici. In maniera analoga, Sheng Li et al. [12] hanno incorporato polvere fine di NMF nel bitume base, sviluppando un compatibilizzante a base di olio di tung e glicerolo per migliorarne l'affinità con la matrice bituminosa. Attraverso indagini microscopiche chimiche e prove reologiche meccaniche, gli autori hanno individuato un contenuto ottimale di NMF pari al 30% in peso. I risultati hanno confermato un aumento di rigidità, stabilità alle alte temperature e resistenza all'accumulo di deformazione permanente, riducendo la sensibilità termica del materiale pur registrando una moderata diminuzione della resistenza alla fessurazione in condizioni climatiche rigide. Nonostante l'efficacia prestazionale riscontrata in questi studi, la complessità delle operazioni di miscelazione richieste dal *wet process* può comportare numerose criticità sia tecniche di laboratorio, sia economiche, limitandone l'applicabilità su larga scala nel breve periodo; inoltre, come riportato sempre nello studio di Yongjun Meng et al. [11], i leganti così ricavati possono manifestare problemi di stabilità durante lo stoccaggio, con conseguenti fenomeni di separazione tra le fasi.

1.6.2 - Dry process

Il *dry process* rappresenta un'alternativa promettente, che prevede l'introduzione di materiali di recupero (di diversa provenienza) direttamente nella miscela di aggregati in tempi differenti rispetto all'aggiunta del legante bituminoso. Tale approccio risulta generalmente più semplice dal punto di vista operativo e maggiormente compatibile con le tecnologie tradizionali degli impianti di produzione. In questo contesto, lo studio proposto da Mohammad Shafiee et al. [13], riscontra un particolare interesse nei confronti delle componenti non metalliche (resine epossidiche, resine fenoliche e fibre di vetro): le resine, infatti, possono contribuire al miglioramento delle proprietà reologiche del bitume ad alte temperature, mentre le fibre di vetro svolgono una funzione di rinforzo capace di incrementare la resistenza meccanica e la tenacità del composito. Alla luce di questo, Mohammad Shafiee et al. [13] hanno progettato una miscela con processo a secco tramite la metodologia Superpave. Sottoponendo il conglomerato a vari test per determinare l'ormaiamento, il danno da fatica e prove di fessurazione, lo studio ha mostrato prestazioni ottime in termini di durabilità. In particolare, il rapporto di resistenza a trazione (TSR) è risultato ampiamente superiore al minimo richiesto (80%), indicando un'elevata resistenza allo stripping (perdita di adesione legante-aggregati). Sempre in riferimento al processo *dry*, invece Ranadive et al. [14] hanno analizzato la sostituzione parziale del filler minerale e degli aggregati con rifiuti elettronici (*e-waste*) e ceneri volanti nelle miscele bituminose destinate alla realizzazione di pavimentazioni stradali flessibili. La campagna sperimentale, condotta con metodologia Marshall, ha individuato una configurazione ottimale con il 5,5% di bitume e il 10% di *e-waste*. In tali condizioni, la stabilità Marshall è aumentata di circa l'11% rispetto alla miscela tradizionale, registrando al contempo una riduzione del 2% della densità del conglomerato, a dimostrazione di un vantaggio sia tecnico ed economico sia di alleggerimento strutturale. Lo studio conclude che sia i rifiuti elettronici, sia le ceneri volanti possono essere efficacemente impiegati come materiali di riempimento nelle miscele bituminose. In particolare, l'utilizzo dell'*e-waste* si è dimostrato vantaggioso, consentendo inoltre di ridurre il consumo di materie prime tradizionali, quali bitume e aggregati naturali.

Coerentemente con questo filone di ricerca sulla sostituzione secca di frazioni lapidee con materiali di recupero, lo studio di Santagata e Bassani [15] (condotto presso il Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino in convenzione con la Provincia di Torino) ha valutato l'impiego di plastiche di riciclo (RDP, nello specifico polistirene rigido da stampi industriali e polipropilene da cassette alimentari) in sostituzione parziale della frazione sabbiosa. Testando due miscele per strati di collegamento (al 4,5% e 5,5% di bitume), la sostituzione effettuata con polistirene rigido (RDP2) ha mostrato le prestazioni più favorevoli,

in confronto alle miscele di riferimento sopra citate, determinando una lieve riduzione del contenuto di vuoti e un incremento significativo della rigidità e della resistenza meccanica.

Alla luce delle evidenze di letteratura, e considerando la maggiore efficienza, semplicità e fattibilità industriale del processo a secco, nella sperimentazione oggetto del presente studio si è scelto di procedere con il *dry process*. Il materiale di recupero è stato quindi introdotto all'interno della miscela per la produzione del conglomerato bituminoso, valutando diverse percentuali di PCB: inizialmente impiegato come materiale di riempimento (filler) e, successivamente, in sostituzione parziale anche della frazione di sabbia. Le metodologie utilizzate e i dettagli dei risultati ottenuti saranno mostrati nel prosieguo dell'elaborato.

CAPITOLO 2 – MATERIALI

All'interno del presente capitolo vengono illustrati nel dettaglio i materiali impiegati nel confezionamento delle miscele oggetto della sperimentazione condotta:

- **Aggregati di riciclo RAP 0/8;**
- **Aggregati vergini: Sabbia 0/4, Pietrisco 7/12, Pietrisco 12/20, Filler;**
- **Bitume stradale 50/70;**
- **Materiale di recupero da circuiti stampati.**

2.1 – Aggregati di riciclo RAP 0/8

Secondo quanto definito dalla norma UNI EN 13108-8:2016 [16], il termine RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) identifica il materiale derivante dalla rimozione degli strati di conglomerato bituminoso appartenenti a pavimentazioni stradali esistenti che risultano degradate, ammalorate o giunte al termine della loro vita utile. La rimozione di tali strati può essere effettuata mediante differenti tecniche operative, principalmente attraverso processi di fresatura o scarifica, la cui scelta dipende da considerazioni di carattere tecnico, economico e logistico. La fresatura viene generalmente eseguita mediante macchine fresatrici, in grado di asportare selettivamente gli strati della sovrastruttura stradale, garantendo al contempo il mantenimento di adeguati profili longitudinali e trasversali della pavimentazione residua. La scarifica, invece, viene realizzata mediante l'impiego di escavatori, ripper o altre attrezzature analoghe ed è adottata nei casi in cui non sia richiesta una particolare regolarità della superficie al termine delle operazioni di demolizione. In ogni caso, il materiale recuperato dalla fresatura o dalla scarifica può essere reimpiegato direttamente nel sito di produzione, oppure trasferito presso impianti autorizzati per lo stoccaggio e il successivo recupero. Solo in casi residuali il RAP viene destinato allo smaltimento in discarica. Grazie alle sue potenzialità di riutilizzo, esso rappresenta una risorsa strategica nell'ambito dell'economia circolare applicata alle infrastrutture stradali (§1.3).

All'interno del manuale *Strade* (Vol. 2, Cap. 11.2) [17], viene spiegato nel dettaglio l'impiego di RAP e le metodologie utilizzate in ambito stradale. A tal proposito, una delle applicazioni principali del RAP consiste nella realizzazione degli strati delle pavimentazioni stradali, mediante l'aggiunta di leganti bituminosi e/o cementizi, nonché nei processi di stabilizzazione degli strati di fondazione. Le prestazioni meccaniche e funzionali del materiale risultano fortemente influenzate sia dalle caratteristiche dei materiali costituenti, sia dalla provenienza del conglomerato originario. Tuttavia, alle caratteristiche illustrate finora, è opportuno ricordare che la principale problematica legata all'impiego del RAP nella produzione di nuove miscele

bituminose, come riportato da F. A. Santagata et al. [17], è riconducibile all'elevato grado di ossidazione del bitume contenuto al suo interno. Tale fenomeno è il risultato di un duplice processo di invecchiamento del legante. Pertanto, al fine di evitare la criticità appena descritta, è importante prestare attenzione alla progettazione delle miscele contenenti RAP, attraverso un'accurata fase di mix design, finalizzata alla definizione della composizione ottimale del conglomerato. Tale attività presuppone la caratterizzazione preliminare degli aggregati vergini e del materiale riciclato, mediante la determinazione delle rispettive distribuzioni granulometriche e delle proprietà fisico-meccaniche. Inoltre, risulta fondamentale la corretta valutazione del contenuto e dello stato di attivazione del bitume invecchiato presente nel RAP, al fine di definire il tipo e il dosaggio di legante vergine da aggiungere ed eventualmente individuare l'opportunità di utilizzare additivi rigeneranti o altri modificanti.

Il RAP impiegato nella presente sperimentazione è un fresato 0/8 (Figura 2.1) e la sua massa volumica è pari a $2,65 \text{ g/cm}^3$. La percentuale di impiego è pari al 30% in peso rispetto agli aggregati come richiesto dal Capitolato Anas per lo strato di binder. La caratterizzazione del materiale è stata svolta attraverso la prova di analisi granulometrica (Tab 2.1), come riportato dalla normativa UNI EN 933-1:2012 [18], da cui è stata ricavata la relativa curva granulometrica (Figura 2.2).



Figura 2.1 – RAP 0/8

Apertura setacci	RAP 0/8
mm	Passante %
20	100,0
16	100,0
12,5	100,0
8	96,7
4	68,8
2	46,1
0,5	22,6
0,25	19,9
0,063	9,0

Tab. 2.1 – *Analisi granulometrica RAP 0/8*

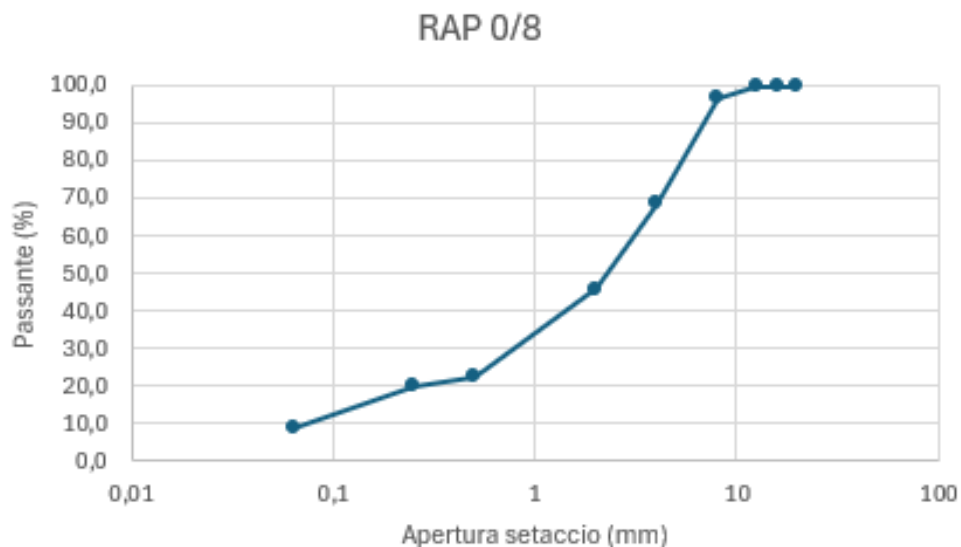


Figura 2.2 – *Curva granulometrica RAP 0/8*

2.2 – Aggregati vergini

In riferimento al manuale *Strade* (Vol. 1, Cap. 6.1) [17], gli aggregati lapidei costituiscono la fase solida dei conglomerati bituminosi e ne influenzano in modo significativo le proprietà meccaniche, funzionali e prestazionali. Per aggregati vergini si intendono materiali di primo impiego non derivanti da processi di recupero o riciclo. In generale, questi possono essere ottenuti sia da depositi naturali, sia da cave di prestito. Nel secondo caso, gli aggregati risultano generalmente preferibili per la produzione di conglomerati bituminosi a elevate prestazioni. Infatti, il processo di frantumazione conferisce ai granuli una maggiore angolarità e una

superficie più rugosa; queste caratteristiche favoriscono l'incastro meccanico tra le particelle e migliorano la resistenza della miscela. Il processo produttivo degli aggregati provenienti da cava prevede una prima fase di estrazione del materiale lapideo, effettuata mediante l'impiego di macchine operatrici o, nei casi necessari, mediante l'utilizzo controllato di esplosivi. Successivamente, il materiale estratto viene sottoposto a operazioni di frantumazione e vagliatura, finalizzate all'ottenimento delle diverse classi granulometriche richieste. Gli aggregati così prodotti vengono quindi stoccati in cumuli distinti e successivamente trasportati agli impianti di produzione del conglomerato bituminoso o direttamente nei cantieri di utilizzo. In base alla loro origine, come riportato da Santagata et al. [17], gli aggregati possono essere classificati in tre categorie principali: naturali, artificiali e riciclati. Indipendentemente dalla provenienza, gli aggregati destinati alla produzione di conglomerati bituminosi devono soddisfare specifici requisiti prestazionali, stabiliti dalle normative tecniche di riferimento e dai Capitolati Anas. Tali requisiti variano in funzione dello strato della pavimentazione in cui il materiale verrà impiegato e sono finalizzati a garantire adeguate prestazioni strutturali e funzionali nel tempo.

Le principali proprietà che caratterizzano gli aggregati possono essere suddivise in tre macrocategorie qui sottoindicate:

- **proprietà geometriche**, quali granulometria, forma delle particelle, tessitura superficiale e grado di angolarità;
- **proprietà fisiche e meccaniche**, tra cui massa volumica, resistenza meccanica e durabilità;
- **proprietà chimiche**, comprendenti la composizione mineralogica e l'affinità con il legante bituminoso.

Tra le proprietà geometriche, la granulometria riveste un ruolo fondamentale poiché influenza in maniera significativa la struttura interna della miscela e, conseguentemente, le sue prestazioni meccaniche. Essa rappresenta la distribuzione dimensionale delle particelle costituenti l'aggregato e viene determinata mediante analisi granulometrica per setacciatura, eseguita utilizzando una serie di setacci normalizzati secondo quanto previsto dalla norma UNI EN 13043:2004 [18]. Oltre alla granulometria, anche la forma delle particelle assume notevole importanza: per questo, si tende a limitare la presenza di elementi allungati o appiattiti, privilegiando granuli di forma cubica o sub-cubica, in grado di garantire un migliore incastro intergranulare e una maggiore stabilità della miscela. La tessitura superficiale degli aggregati influenza invece le caratteristiche di adesione tra pneumatico e pavimentazione, nonché l'interazione tra aggregato e legante bituminoso. Ad esempio, una superficie più rugosa favorisce l'aderenza e contribuisce ad aumentare la superficie specifica disponibile per il

rivestimento bituminoso, incidendo pertanto sul quantitativo di legante necessario per assicurare un corretto ricoprimento dei granuli. Un ulteriore parametro rilevante è il grado di angolarità, che esprime la presenza di spigoli vivi e superfici non arrotondate. Elevati valori di angolarità incrementano l'attrito interno e migliorano l'interblocco meccanico tra le particelle, contribuendo positivamente alla resistenza della miscela alle deformazioni permanenti.

Gli aggregati vergini, come spiegato nel manuale [17], vengono identificati mediante una designazione granulometrica d/D , dove “d” rappresenta la dimensione minima e “D” la dimensione massima della frazione considerata, definite in base alle aperture nominali dei setacci di riferimento. Codifica tuttora utilizzata nel mondo delle imprese e pubbliche amministrazioni del settore. Sempre secondo la classificazione prevista dalla norma UNI EN 13043:2004 [18], gli aggregati si distinguono in:

- **aggregati grossi**, caratterizzati da dimensione minima $d \geq 4$ mm e dimensione massima $D \leq 31,5$ mm;
- **aggregati fini**, caratterizzati da dimensione massima $D \leq 4$ mm e dimensione minima d pari a 0 mm;
- **filler**, costituito dalla frazione passante al setaccio da 0,063 mm.

Nell'ambito della presente attività sperimentale sono state impiegate le seguenti frazioni granulometriche di aggregati lapidei vergini: sabbia 0/4 mm, pietrisco 7/12 mm, pietrisco 12/20 mm e filler. Tali materiali sono stati così selezionati al fine di ottenere una curva granulometrica idonea alla formulazione delle miscele oggetto di studio e al raggiungimento delle prestazioni previste dal progetto.

2.2.1 – Sabbia 0/4

La sabbia utilizzata per la realizzazione delle miscele oggetto di studio (Figura 2.3) è di tipo naturale e proviene dall'azienda Inerti Ferretti di Ascoli Piceno (AP). La sua massa volumica è pari a $2,60 \text{ g/cm}^3$. Si riporta la relativa analisi granulometrica (Tab. 2.2) da cui si ricava la curva granulometrica (Figura 2.4).



Figura 2.3 – Sabbia 0/4

Apertura setacci	Sabbia 0/4
mm	Passante %
20	100,0
16	100,0
12,5	100,0
8	99,5
4	88,6
2	46,4
0,5	8,2
0,25	3,6
0,063	2,2

Tab. 2.2 – Analisi granulometrica Sabbia 0/4

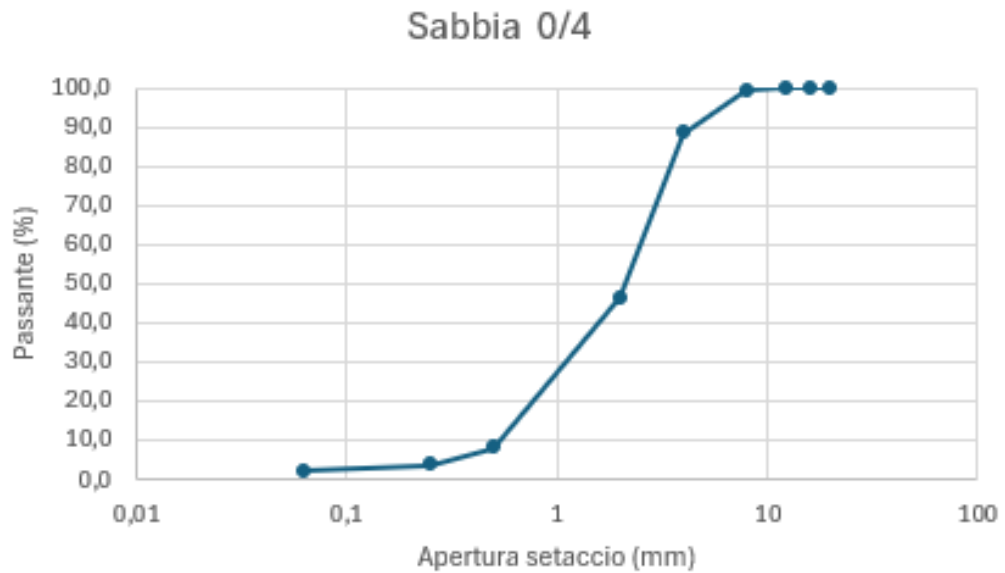


Figura 2.4 – *Curva granulometrica Sabbia 0/4*

2.2.2 – Pietrisco 7/12

Il pietrisco 7/12 utilizzato nella sperimentazione (Figura 2.5), proveniente sempre dallo stesso impianto di produzione della sabbia, ha una massa volumica pari a $2,61 \text{ g/cm}^3$. La distribuzione granulometrica (Tab. 2.3) e relativa curva granulometrica (Figura 2.6) sono riportate di seguito.



Figura 2.5 – *Pietrisco 7/12*

Apertura setacci	Pietrisco 7/12
mm	Passante %
20	100,0
16	100,0
12,5	87,4
8	42,2
4	0,7
2	0,2
0,5	0,2
0,25	0,1
0,063	0,1

Tab. 2.3 – *Analisi granulometrica Pietrisco 7/12*

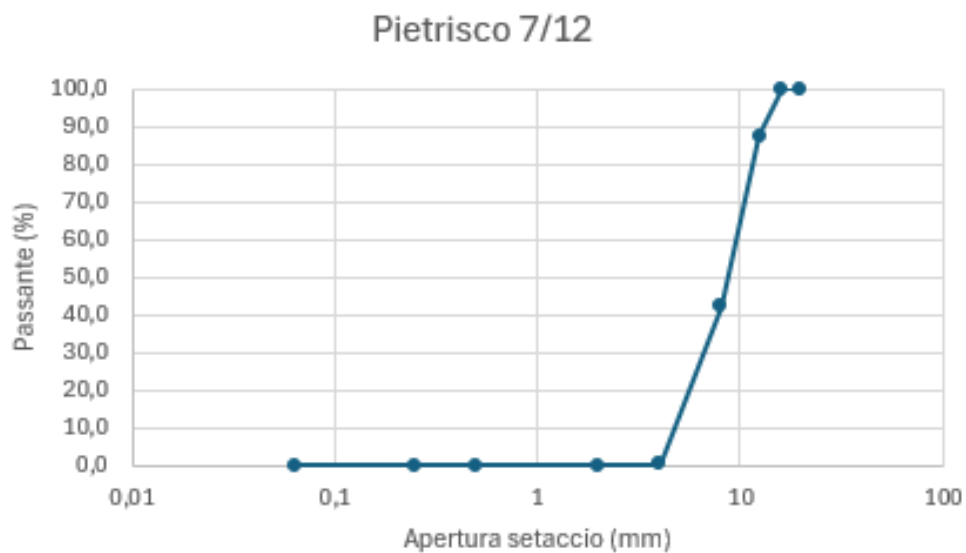


Figura 2.6 – *Curva granulometrica Pietrisco 7/12*

2.2.3 – Pietrisco 12/20

Il pietrisco 12/20, sempre della stessa provenienza (Figura 2.7), presenta invece una massa volumica pari a $2,65 \text{ g/cm}^3$. Allo stesso modo si riportano l'analisi granulometrica (Tab. 2.4) e relativa curva granulometrica (Figura 2.8).



Figura 2.7 – Pietrisco 12/20

Apertura setacci	Pietrisco 12/20
mm	Passante %
20	93,1
16	52,9
12,5	7,8
8	0,3
4	0,2
2	0,2
0,5	0,2
0,25	0,2
0,063	0,1

Tab. 2.4 – Analisi granulometrica Pietrisco 12/20

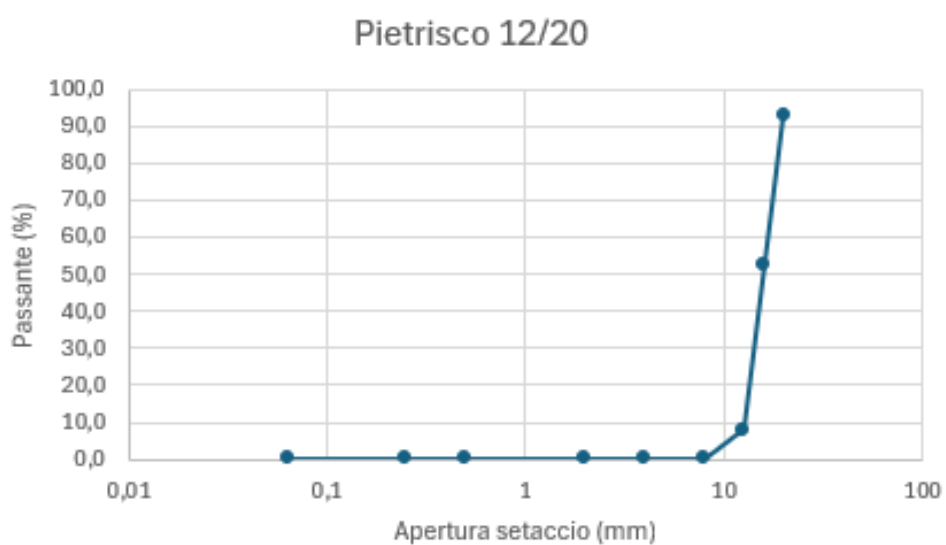


Figura 2.8 – Curva granulometrica Pietrisco 12/20

2.2.4 – Filler

Per filler si intende l'aggregato minerale finissimo, con dimensioni inferiori a 0,063 mm. La sua funzione principale è quella di formare con il bitume il mastice; il quale permette di prevenire lo spogliamento, evitare fenomeni di trasudamento e migliorare la stabilità della miscela [17]. Il filler oggetto della presente attività sperimentale (Figura 2.9) proviene sempre dall'azienda Inerti Ferretti, presenta la seguente distribuzione granulometrica (Tab. 2.5) e la relativa curva granulometrica (Figura 2.10). La sua massa volumica è pari a 2,66 g/cm³.



Fig. 2.9 – Filler

Apertura setacci	Filler
mm	Passante %
20	100
16	100
12,5	100
8	100
4	100
2	100
0,5	100
0,25	100
0,063	92

Tab. 2.5 – Analisi granulometrica Filler

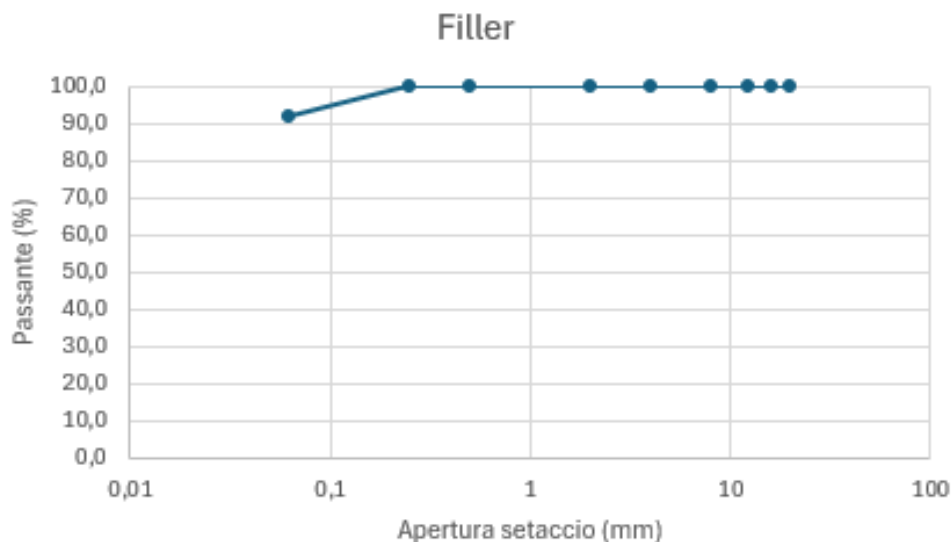


Fig. 2.10 – *Curva granulometrica Filler*

2.3 – Bitume

Il bitume, secondo quanto riportato da Santagata et al. (*Vol. I, Cap. 6.2*) [17], è un materiale di origine petrolifera ottenuto come residuo dei processi di raffinazione del petrolio greggio. Il metodo di produzione maggiormente diffuso è la distillazione frazionata, un processo che consente la separazione delle diverse componenti del greggio sulla base delle rispettive temperature di ebollizione. Le frazioni più leggere vengono progressivamente allontanate, mentre il residuo più pesante costituisce la base per la produzione del bitume destinato alle applicazioni stradali. Nell'ambito dei conglomerati bituminosi, il bitume svolge la funzione di legante, garantendo la coesione tra le particelle di aggregato e contribuendo alla capacità della miscela di resistere alle sollecitazioni meccaniche indotte dal traffico veicolare. Sebbene rappresenti una quota relativamente ridotta della miscela, generalmente compresa tra il 4% e il 6% in peso, le sue proprietà influenzano in maniera determinante il comportamento prestazionale del conglomerato, al pari delle caratteristiche degli aggregati lapidei. L'impiego del bitume nella realizzazione delle pavimentazioni stradali è principalmente riconducibile alla sua capacità di conferire alla miscela proprietà di adesione, coesione e impermeabilità. La prima descrive il legame che si instaura tra il legante e la superficie degli aggregati, mentre la seconda rappresenta la capacità intrinseca del bitume di mantenere unite le proprie particelle. L'impermeabilità, infine, limita la penetrazione dell'acqua all'interno della struttura della pavimentazione, contribuendo a preservarne la durabilità nel tempo. In riferimento al manuale [17], dal punto di vista meccanico, il bitume presenta un comportamento viscoelastico fortemente dipendente dalla temperatura e dal tempo di applicazione del carico. Le sue proprietà

reologiche variano significativamente al variare delle condizioni ambientali e delle frequenze di sollecitazione: alle elevate temperature il materiale manifesta un comportamento maggiormente viscoso e deformabile, mentre alle basse temperature tende ad assumere caratteristiche più rigide ed elastiche. Di conseguenza, la selezione del tipo di bitume da impiegare deve essere effettuata considerando attentamente le condizioni climatiche e operative previste durante la vita utile della pavimentazione. Il comportamento reologico del legante è strettamente correlato ai componenti della sua struttura chimica, ossia, principalmente: asfalteni, malteni e resine (Santagata et al. [17]). L'equilibrio tra tali componenti determina la struttura colloidale del bitume e ne influenza direttamente le proprietà fisiche e meccaniche.

2.3.1 - L'ossidazione del bitume

Con il passare del tempo, il legante, a contatto con l'aria e, dunque, l'ossigeno, va incontro a ossidazione, ovvero, il processo di degradazione e invecchiamento, dal momento che l'equilibrio donato al bitume dai componenti sopracitati non rimane costante nel tempo. L'ossidazione del bitume è generalmente suddivisa in due fasi (Santagata et al. [17]): l'invecchiamento a breve termine (*Short-Term Aging*) e quello a lungo termine (*Long-Term Aging*). Il primo si verifica durante le operazioni di produzione, trasporto e stesa del conglomerato bituminoso, quando il legante viene esposto a temperature elevate, solitamente superiori a 130°C. Il secondo invece, si sviluppa durante l'intera vita in esercizio della pavimentazione ed è dovuto all'azione combinata degli agenti atmosferici, quali radiazione solare, ossigeno, acqua e variazioni termiche. In entrambi i casi, i processi ossidativi determinano una progressiva perdita delle componenti più leggere e volatili del bitume, prevalentemente riconducibili alla frazione dei malteni. Tale fenomeno comporta un aumento relativo del contenuto di asfalteni, con conseguente incremento della viscosità e della rigidità del legante. Sebbene tale evoluzione possa determinare un miglioramento della resistenza alle deformazioni permanenti, essa comporta anche una maggiore suscettibilità alla fessurazione, soprattutto alle basse temperature e in presenza di sollecitazioni cicliche ripetute. Il fenomeno dell'invecchiamento del bitume è ritenuto particolarmente interessante nell'ambito delle tecnologie di riciclo dei conglomerati bituminosi. Infatti, il legante presente nel materiale fresato (RAP) risulta generalmente caratterizzato da elevati livelli di ossidazione e rigidità. Durante la produzione delle nuove miscele, il bitume invecchiato tende a riattivarsi e a interagire con il legante vergine aggiunto, influenzando il comportamento complessivo del conglomerato riciclato. Di conseguenza, le miscele contenenti elevate percentuali di RAP possono manifestare una maggiore rigidità e una ridotta capacità deformativa rispetto alle

miscele tradizionali. Per compensare tali effetti e permettere il ripristino di adeguate caratteristiche reologiche del legante, risulta spesso necessario adottare specifiche strategie di progettazione della miscela, quali l'impiego di bitumi vergini caratterizzati da una minore consistenza, oppure l'utilizzo di additivi rigeneranti, in grado di ristabilire, almeno parzialmente, l'equilibrio originario tra le diverse frazioni costitutive del bitume.

2.3.2 - Bitume stradale 50/70

La tipologia di legante impiegata nella presente sperimentazione è un bitume stradale tradizionale 50/70 (Figura 2.11).



Figura 2.11 – *Bitume 50/70*

La tabella sottostante mostra le principali caratteristiche del bitume utilizzato (Tab. 2.5).

Descrizione prova	Prestazione		Norme di riferimento	Specifica tecnica armonizzata
	Unità di misura	Valore dichiarato		
Valore della penetrazione	0,1 mm	50/70	UNI EN 1426	UNI EN 12591: 2009
Punto di rammollimento	°C	46-54	UNI EN 1427	
Resistenza all'indurimento			UNI EN 12607-1	
Variazione della massa	%	≤ 0,5		
Penetrazione dopo indurimento	%	≥ 50	UNI EN 1426	
Variazione del punto di rammollimento	°C	≤ 11	UNI EN 1427	
Punto di infiammabilità	°C	≥ 230	UNI EN ISO 2592	
Solubilità	%	≥ 99,0	UNI EN 12592	
Punto di rottura Fraas	°C	≤ -8	UNI EN 12593	

Tab. 2.5 – *Specifiche tecniche bitume stradale 50/7*

2.4 – Materiale di recupero da circuiti stampati

Il materiale di recupero proveniente da circuiti stampati (PCB), è stato prelevato dal Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente dell'Università Politecnica delle Marche. In particolare, i PCB utilizzati dal laboratorio di Scienze sono stati forniti dall'Università degli Studi dell'Aquila e sono derivanti da personal computer a elevato contenuto metallico. Il processo di disassemblaggio, seguito da frammentazione meccanica del materiale residuo e infine terminato con bio-liscivazione, descritto nello studio proposto da Becci et al. [10], (§1.6), è stato condotto con l'obiettivo di rimuovere i metalli presenti. Per l'attività sperimentale condotta, particolare importanza è rivolta alla frazione non metallica all'interno di tale materiale di recupero. Infatti, nel seguito del presente elaborato si descrive l'integrazione del materiale di recupero in oggetto (Figura 2.12) nella miscela di conglomerato bituminoso. Vengono specificate le differenti percentuali adottate per ogni miscela, prestando particolare attenzione alla differenza tra il peso specifico di questo materiale (1,887 g/cm³) e quello del filler tradizionale (2,66 g/cm³), per poi esporne, in conclusione, i risultati ottenuti. Per il calcolo della sua massa volumica sono state effettuate misurazioni tramite la procedura standardizzata UNI EN 1097-7:2008 [19].



Figura 2.12 – *Materiale di recupero da PCB*

2.5 – Conglomerato bituminoso

Secondo la definizione fornita dal manuale *Strade* (Vol. 1, Cap. 6.6) [17], il conglomerato bituminoso è un materiale composito formato da una miscela opportunamente progettata di aggregati lapidei, vergini e/o provenienti da processi di recupero, dal legante bituminoso e da eventuali additivi o modificanti. Questi ultimi possono essere inseriti nella miscela allo scopo di migliorarne specifiche proprietà, quali: lavorabilità, durabilità, resistenza alle deformazioni permanenti o suscettibilità all'invecchiamento. Il legante utilizzato può essere costituito da bitume tradizionale oppure da bitume modificato mediante l'aggiunta di polimeri. Infatti, attraverso un'adeguata selezione e combinazione delle diverse tipologie di aggregati, del legante e degli eventuali additivi, è possibile ottenere miscele in grado di soddisfare differenti requisiti funzionali e strutturali; tra questi, assumono particolare rilevanza la regolarità superficiale, l'aderenza, l'impermeabilità, la rumorosità, la drenabilità e la capacità portante della pavimentazione. Secondo quanto riportato da Santagata et al. [17], la progettazione della miscela si basa sulla corretta definizione della composizione granulometrica degli aggregati – che deve includere tutte le frazioni dimensionali, dagli elementi più grossolani fino al filler – e sull'accurato dosaggio del legante bituminoso. Da ciò deriva l'importanza di rispettare precise caratteristiche volumetriche, con particolare riferimento a un adeguato contenuto di vuoti, al fine di garantire elevate prestazioni meccaniche e funzionali. Una miscela ottimamente progettata deve infatti coniugare un'elevata stabilità, intesa come capacità di resistere alle deformazioni permanenti indotte dal traffico, a una sufficiente resistenza a fatica, indispensabile per contrastare l'insorgenza e la propagazione di fenomeni fessurativi dovuti alle ripetute applicazioni di carico.

I conglomerati destinati alla realizzazione degli strati superficiali della pavimentazione costituiscono l'interfaccia diretta tra il veicolo e l'infrastruttura stradale e per questo devono soddisfare simultaneamente numerosi requisiti prestazionali. Tra questi, uno dei più importanti è rappresentato dall'aderenza pneumatico-pavimentazione, elemento fondamentale ai fini della sicurezza stradale. Tale proprietà dipende principalmente dalla natura mineralogica degli aggregati e dalle caratteristiche di microtessitura e macrotessitura della superficie stradale. Ulteriori requisiti riguardano la regolarità superficiale, il contenimento della rumorosità generata dal traffico e la capacità della pavimentazione di mantenere inalterate nel tempo le proprie prestazioni funzionali e strutturali. Una maggiore durabilità consente di ridurre la frequenza degli interventi manutentivi e quindi anche i costi associati al ciclo di vita dell'infrastruttura.

In generale, i conglomerati bituminosi tradizionali sono comunemente definiti "a caldo" (*Hot Mix Asphalt*, HMA). Tale denominazione deriva dalle modalità di produzione e posa in opera della miscela. Il confezionamento avviene infatti in appositi impianti industriali, dove gli aggregati vengono preliminarmente essiccati e riscaldati, successivamente miscelati secondo la curva granulometrica di progetto e infine rivestiti mediante spruzzatura del legante bituminoso. Durante la fase di produzione, la temperatura degli aggregati è generalmente compresa tra i 160 °C e i 180 °C, mentre quella del bitume varia normalmente tra i 150 °C e i 170 °C. Tali temperature consentono di ridurre la viscosità del legante e garantiscono un efficace ricoprimento degli aggregati, assicurando al contempo adeguate condizioni di lavorabilità durante le successive fasi di trasporto, stesa e compattazione della miscela. La figura sottostante (Fig. 2.13) mostra un campione di conglomerato prodotto in laboratorio ottenuto tramite l'impiego dei materiali descritti in precedenza.



Figura 2.13 – Conglomerato bituminoso prodotto in laboratorio

2.6 – Curva granulometrica di progetto

In riferimento alla percentuale di materiale di recupero da circuiti stampati impiegato, si realizzano quattro diverse miscele codificate nel modo seguente:

- **H-0-REF;**
- **H-0.1;**
- **H-0.2;**
- **H-0.4.**

La codifica segue tali assunzioni: la lettera “H” significa *HOT*, trattandosi di miscele prodotte con il metodo a caldo; il numero che segue (0 – 0.1 – 0.2 – 0.4) rappresenta la percentuale di materiale di recupero da circuiti stampati impiegato nella miscelazione. Nel seguito dell’elaborato, di fianco a ciascuna miscela, vengono riportati inoltre i nominativi delle prove di laboratorio eseguite (COMP, ITS, ITSr), al fine di valutare la caratterizzazione fisico-meccanica.

Per quanto riguarda la composizione granulometrica impiegata nella prima miscelazione, così come le altre, è stata studiata al fine di far rientrare la curva granulometrica di progetto (Figura 2.14) all’interno del fuso di riferimento, previsto dal Capitolato Anas per lo strato di binder. Di seguito, si elencano nel dettaglio le quantità utilizzate:

- Aggregato riciclato RAP 0/8, in quantità pari al 30% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 7/12, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 12/20, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Sabbia 0/4, in quantità pari al 26% in peso degli aggregati;
- Filler tradizionale, in quantità iniziale pari al 4% in peso degli aggregati;
- Materiale di recupero da circuiti stampati, in quantità pari allo 0% in peso degli aggregati.

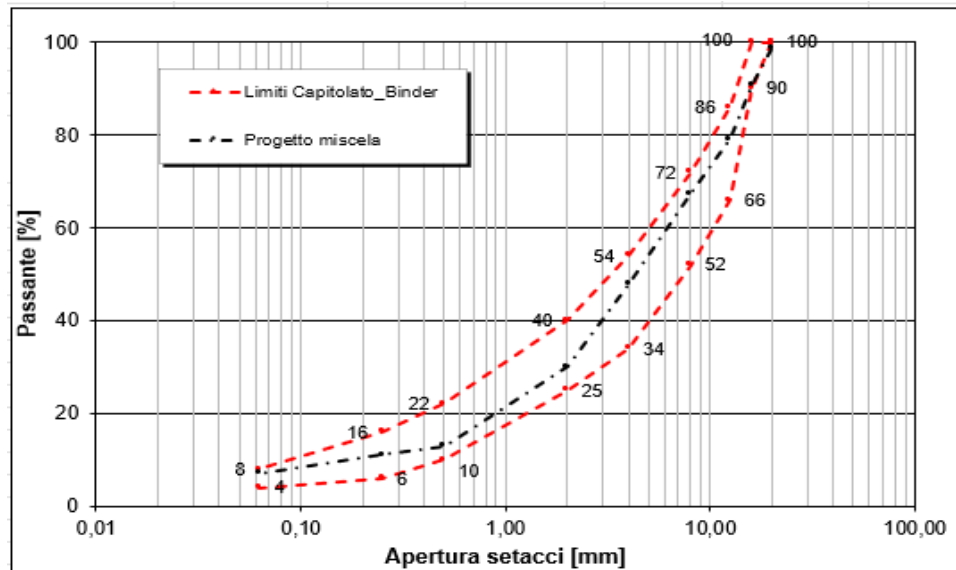


Figura 2.14 – Curva granulometrica di progetto H-0

Allo stesso modo, anche per le altre miscele si è studiata la relativa curva granulometrica di progetto (Fig. 2.15, 2.16, 2.17). Nello specifico, la composizione granulometrica prevista per la seconda miscelazione (H-0.1) è la seguente:

- Aggregato riciclato RAP 0/8, in quantità pari al 30% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 7/12, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 12/20, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Sabbia 0/4, in quantità iniziale pari al 26% in peso degli aggregati;
- Filler tradizionale, in quantità iniziale pari al 3% in peso degli aggregati;
- Materiale di recupero da circuiti stampati, in quantità pari allo 0,7% in peso, corrispondente all'1% in volume degli aggregati.

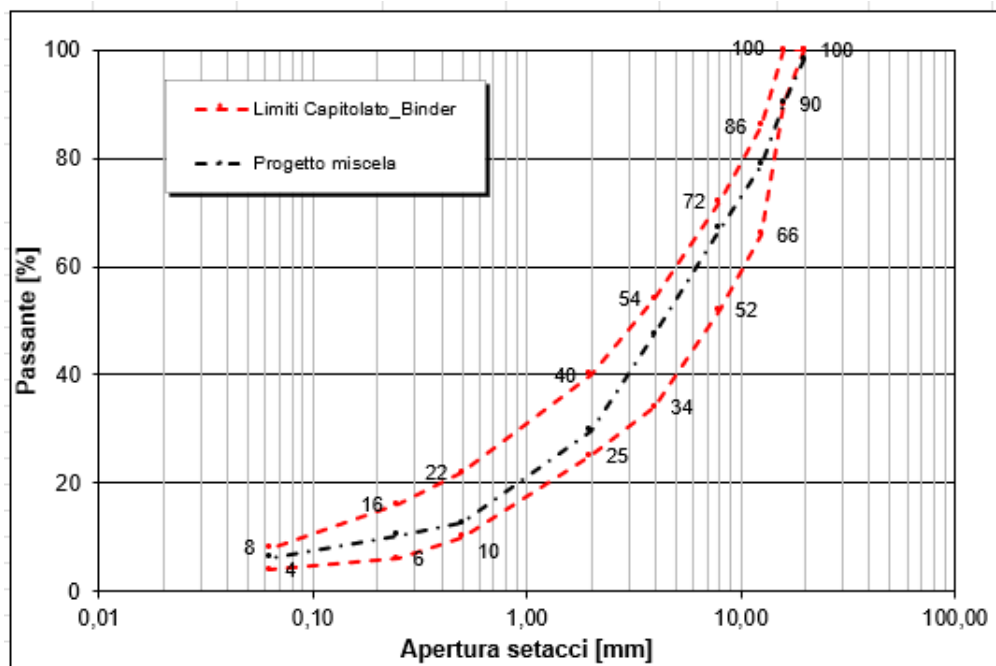


Fig. 2.15 – *Curva granulometrica di progetto H-0.1*

Nella terza miscelazione si impiega un quantitativo maggiore di materiale di recupero (H-0.2), nel dettaglio le quantità previste sono:

- Aggregato riciclato RAP 0/8, in quantità pari al 30% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 7/12, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 12/20, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Sabbia 0/4, in quantità iniziale pari al 26% in peso degli aggregati;
- Filler tradizionale, in quantità iniziale pari al 2% in peso degli aggregati;
- Materiale di recupero da circuiti stampati, in quantità pari a 1,4% in peso, corrispondente al 2% in volume degli aggregati.

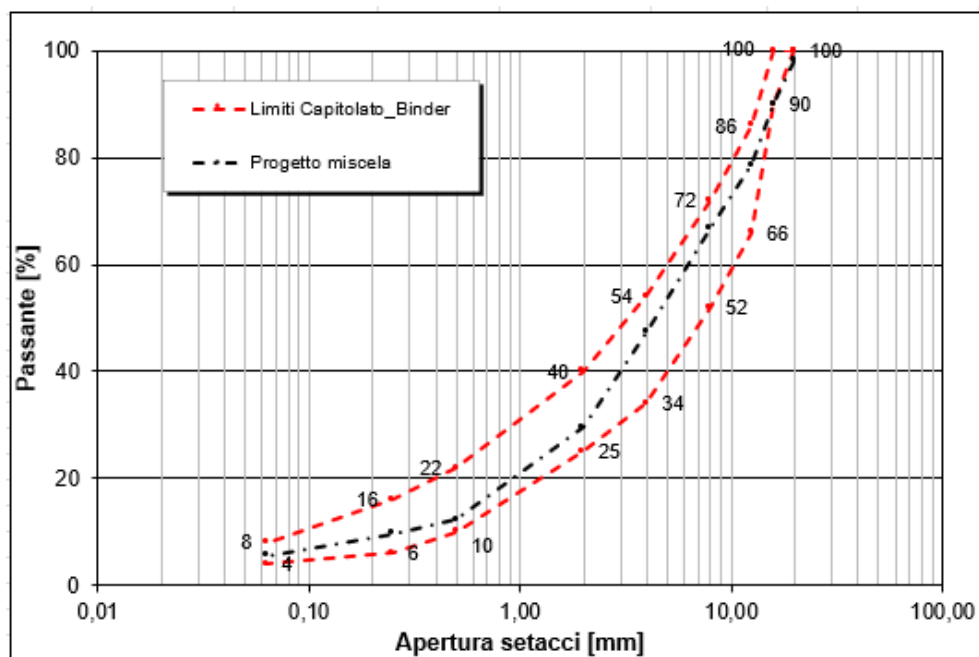


Fig. 2.16 – Curva granulometrica di progetto H-0.2

Infine, nell'ultima miscelazione si è deciso di cambiare approccio; il materiale di recupero è sostituito parzialmente anche alla frazione di sabbia, e per questo motivo, non più considerato solo come materiale di riempimento al posto del filler. Si riportano con precisione le quantità previste:

- Aggregato riciclato RAP 0/8, in quantità pari al 30% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 7/12, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Pietrisco 12/20, in quantità pari al 20% in peso degli aggregati;
- Sabbia 0/4, in quantità iniziale pari al 24,1% in peso degli aggregati;
- Filler tradizionale, in quantità iniziale pari al 3% in peso degli aggregati;
- Materiale di recupero da circuiti stampati, in quantità pari al 2,9% in peso, corrispondente al 4% in volume degli aggregati.

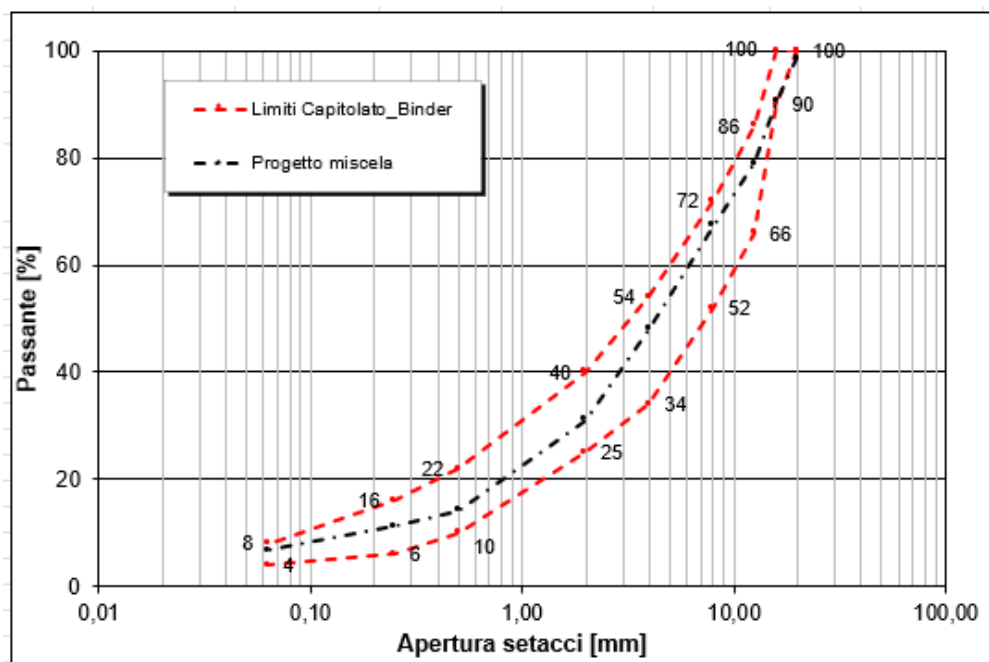


Fig. 2.17 – Curva granulometrica di progetto H-0.4

CAPITOLO 3 – PROGRAMMA SPERIMENTALE

3.1 – Finalità della sperimentazione

Questo capitolo illustra il lavoro sperimentale condotto presso il Laboratorio di Strade e Trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. Partendo dagli obiettivi della ricerca, si identificano le miscele di conglomerato bituminoso confezionate a caldo impiegate nella sperimentazione, descrivendo quindi l'organizzazione del programma sperimentale. In seguito, vengono descritte tutte le apparecchiature di laboratorio utilizzate con le relative procedure di prova. Al fine di ottenere risultati rappresentativi e confrontabili, nella fase operativa del lavoro sperimentale, ci si avvale di procedure standardizzate. Nel dettaglio si analizza la fattibilità dell'impiego di materiale di recupero proveniente dai circuiti stampati, in diverse percentuali, all'interno di miscele di conglomerato bituminoso per strati di binder. Per quanto riguarda il confronto tra le diverse miscele realizzate, sono state eseguite valutazioni del contenuto dei vuoti, dell'indice di compattabilità (CEI), prove di rottura a trazione indiretta (ITS), calcolo del coefficiente di trazione indiretta (CTI) e di suscettibilità all'acqua (ITSR).

3.2 – Apparecchiature e protocolli di prova

In questa sezione vengono presentate le metodologie di prova e le strumentazioni utilizzate durante la sperimentazione, con i relativi protocolli di prova.

3.2.1 – Analisi granulometrica degli aggregati

Per la determinazione della distribuzione granulometrica di un aggregato si ricorre alla separazione mediante setacciatura con stacci di maglia diversa ottenendo i pesi delle singole frazioni granulometriche. Questi ultimi, espressi in percentuale rispetto al peso dell'intero campione analizzato, permettono di calcolare il materiale passante a ogni setaccio. Secondo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1:2012 [20], per ricavare la “*curva granulometrica*” del singolo aggregato, si riportano i risultati ottenuti circa il materiale passante in funzione dell'apertura del setaccio (in mm). Si dispone una pila di setacci a maglie quadrate (Figura 3.1), di dimensioni decrescenti, dall'alto verso il basso. Le aperture dei setacci sono rispettivamente di: 20; 16; 12,5; 8; 4; 2; 0,50; 0,25 e 0,063 mm. Si pone una quantità nota di campione sulla sommità della pila di setacci, comprensiva di fondo, e il tutto posizionato in un

vibrovaglio che, una volta azionato, facilita la vagliatura tramite un'azione meccanica orizzontale (Fig. 3.2).



Fig. 3.1 – *Pila di setacci a maglia quadrata*



Fig. 3.2 – *Vibrovaglio*

Successivamente, si pesa la porzione di materiale trattenuta da ciascun setaccio e, conoscendo il peso iniziale del campione, si determina la percentuale di materiale che passa per un setaccio con un certo diametro. All'interno della curva granulometrica si riportano i risultati ottenuti

dall'analisi granulometrica all'interno di un grafico, dove; sull'asse delle ordinate si riportano i valori dei passanti cumulativi (in percentuale) in scala aritmetica e sull'asse delle ascisse le dimensioni delle aperture dei setacci (in mm) in scala logaritmica. Le curve granulometriche ottenute per ciascun materiale impiegato (i cui grafici sono riportati nel Cap. 2), vengono poi utilizzate per la realizzazione della curva di progetto secondo i limiti previsti dal Capitolato Anas per lo strato di binder (§2.6).

3.2.2 – Determinazione della massa volumica del materiale di recupero

In accordo alla UNI EN 1097-7:2008 [19], la determinazione della massa volumica viene eseguita su tre campioni distinti, utilizzando uno o più picnometri precedentemente calibrati e un liquido di riempimento a densità nota. Per ciascuna delle tre determinazioni, la procedura sperimentale si articola come segue. Innanzitutto, si determina la massa del picnometro pulito, asciutto e provvisto di tappo (m_0) e si inserisce al suo interno una porzione di filler pari a (10 ± 1) g estratta dal campione di prova, registrando la nuova massa complessiva (m_1). Successivamente, si aggiungono alcool e acqua fino a sommergere completamente il provino. Il picnometro, chiuso con il tappo, viene quindi collocato all'interno di un essiccatore a vuoto; mediante l'azione di una pompa, si riduce la pressione interna al di sotto di 3 kPa in circa cinque minuti, mantenendo tale condizione di depressione per almeno trenta minuti, per far uscire l'aria presente. Una volta ripristinata la pressione atmosferica nell'essiccatore, il picnometro viene estratto e riempito con lo stesso liquido (alcool o acqua). Il dispositivo, temporaneamente privo di tappo, viene immerso in un bagno termostatico regolato a $(25 \pm 0,1)$ °C, posizionandolo in modo tale che sporga di 2 o 3 mm oltre il livello dell'acqua. Trascorsa un'ora, si inserisce il tappo, provocando l'espulsione del liquido in eccesso attraverso il condotto capillare. Infine, dopo aver asciugato l'estremità del capillare, il picnometro viene rimosso dal bagno termostatico e raffreddato rapidamente sotto acqua corrente fredda, così da prevenire fenomeni di espansione termica del fluido dovuti alla successiva manipolazione. Dopo aver asciugato le pareti esterne, si procede alla pesatura finale del picnometro contenente il provino e il liquido di riempimento (m_2). Di seguito, si indica la formula per il calcolo della densità del materiale.

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}}$$

Dove:

- ρ_f è la massa volumica del materiale a 25°C [g/cm³];
- m_1 è la massa del picnometro con il materiale al suo interno, calcolata in grammi;
- m_0 è la massa del picnometro vuoto con tappo, calcolata in grammi;
- V_p è il volume noto del picnometro, in metri cubi;
- m_2 è la massa del picnometro con il materiale e il liquido di immersione, calcolata in grammi;
- ρ_l è la massa volumica del liquido di immersione a 25°C [g/cm³].

I risultati sono illustrati nella seguente tabella (Tab. 3.1).

PICNOMETRO		prova con alcol come liquido		prova con acqua come liquido
m0 (g)		143,4		143,4
m1 (g)		195		206,3
m2 (g)		417		468,3
m3 (g)		388,2		438,5
p alcol (90%) (20°C) (g/ml)		0,82918		
p acqua (a 20°C) (g/ml)				0,9982
V (ml)		295,231		295,63214
pf (g/ml)		1,8766		1,8969
media pf (g/ml)			1,887 [g/cm3]	

Tab. 3.1 – Massa volumica materiale di recupero

3.2.3 – Determinazione della massa volumica massima delle miscele

Per massa volumica massima si intende la massa per unità di volume (quindi senza vuoti d'aria) di una miscela di conglomerato bituminoso sfusa a una temperatura di prova nota. In accordo alla normativa europea UNI EN 12697-5:2008 [22], ai fini del calcolo è previsto: un procedimento volumetrico, un procedimento idrostatico e uno matematico. Nel procedimento volumetrico il volume del campione è misurato come lo spostamento dell'acqua o solvente da parte del campione in un picnometro. Nel procedimento idrostatico invece, il volume del campione è calcolato a partire dalla massa essiccata del campione e dalla sua massa nell'acqua. Infine, nel procedimento matematico, la massa volumica massima di una miscela bituminosa è calcolata a partire dalla sua composizione (contenuto di legante e di aggregati) e dalle densità delle miscele che la costituiscono. Tra i metodi appena enunciati e riportati nella normativa

[22], in questa sperimentazione si è scelto di utilizzare sia il procedimento matematico che quello volumetrico, confrontando i risultati ottenuti.

3.2.3.1 – Procedimento volumetrico

Secondo quanto riportato dalla normativa UNI EN 12697-5:2008 [22], la massa volumica massima della miscela bituminosa ottenuta mediante il procedimento volumetrico (A) deve essere calcolata come segue:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times [V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w]}$$

Dove:

- ρ_{mv} è la massa volumica massima della miscela bituminosa determinata mediante il procedimento volumetrico, [g/cm³];
- m_1 è la massa del picnometro più la testa, in grammi;
- m_2 è la massa del picnometro più la testa e il campione di prova, in grammi;
- m_3 è la massa del picnometro più la testa, il campione di prova e l'acqua o solvente, in grammi;
- V_p è il volume del picnometro, in metri cubi;
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua o solvente alla temperatura di prova, [g/cm³].

Per determinare la massa volumica dell'acqua si fa riferimento a quanto riportato dalla normativa UNI EN 12697-5: 2008 [22], dove ad ogni temperatura dell'acqua associa un valore della massa volumica di riferimento utilizzato nel calcolo. Il protocollo sperimentale dell'analisi volumetrica, eseguito in laboratorio, si sviluppa attraverso le seguenti fasi operative. Si pesa sulla bilancia la massa (m_1) del picnometro vuoto (compresa la testa, di volume noto V_p); successivamente, il materiale essiccato e portato a temperatura ambiente si colloca nel picnometro e si pesa nuovamente insieme alla testa (m_2). Si procede quindi al riempimento del picnometro con acqua, sempre a temperatura controllata, fino ad un massimo di 30 mm al di sotto della testa. Una volta saturato il sistema con acqua, l'aria residua viene espulsa tramite l'applicazione di un vuoto parziale (Figura 3.3), applicando una pressione residua di 4 kPa all'interno del dispositivo, per un tempo di circa quindici minuti. In seguito, si preleva il picnometro pieno d'acqua (Figura 3.4) e si pesa immediatamente (m_3). Si preleva il materiale contenuto all'interno dell'apparecchio, asportando completamente tutti i residui al suo interno

e, infine, viene pesato (Figura 3.5) riempiendolo, sempre con acqua a temperatura controllata, fino alla testa (m_4). Quest'ultimo valore è stato ricavato al fine di ottenere il volume del picnometro. A questo punto si ricava il valore della massa volumica massima, attraverso la formula precedente (ρ_{mv}), come media tra le due ripetizioni effettuate (Tabella 3.2). Al fine di ottenere un risultato rappresentativo, la differenza tra i due valori ottenuti non deve discostare più dell'1%.



Fig. 3.3 – *Picnometro sottoposto a un vuoto parziale*



Fig. 3.4 – *Pesata del picnometro, materiale e acqua (m_3)*



Fig. 3.5 – Pesata finale del picnometro con acqua (m_4)

H-0-REF						
1' prova				2' prova		
T _{acqua}	21 °C			21,5 °C		
m1 (massa picnometro + testa)	1028,1 g			m1	1027,8 g	
m2 (massa picnometro + testa+materiale)	2029,2 g			m2	2028 g	
m3 (massa picnometro + testa+materiale+acqua)	3783,9 g			m3	3785,3 g	
m4 ((massa picnometro + testa+acqua)	3190,6 g			m4	3190,7 g	
ρ acqua (g/cm ³)	0,9981			ρ acqua (g/ml)	0,9979	
V	2166,62	0,0021666		V	2167,452	0,002167452
ρ (g/ml)		2,450		ρ (g/ml)	2,461	
		media ρ	2.456			

Tab. 3.2 – Determinazione massa volumica massima tramite procedimento volumetrico della miscela H-0

3.2.3.2 – Procedimento matematico

La massa volumica massima della miscela bituminosa determinata mediante il procedimento matematico (C), sempre in riferimento alla normativa UNI EN 12697-5:2008 [22], deve essere calcolata come segue:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

Dove:

- ρ_{mc} è la massa volumica massima della miscela ottenuta mediante calcolo, [g/cm³];
- p_a è la percentuale di aggregati nella miscela;

- ρ_a è la massa volumica apparente degli aggregati, $[\text{g}/\text{cm}^3]$;
- p_b è la percentuale di legante nella miscela;
- ρ_b è la massa volumica del legante bituminoso a 25°C , $[\text{g}/\text{cm}^3]$;

Risulta imprescindibile garantire che la somma delle frazioni percentuali in peso degli aggregati e del legante all'interno della miscela ($p_a + p_b$) sia rigorosamente pari al 100%. Tale condizione di congruenza rappresenta il fondamento del processo di mix design delle miscele oggetto di studio, i cui dosaggi sono dettagliati nelle Tabelle 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 sopra riportate (§3.2.2). Si precisa che, qualora vengano impiegati aggregati caratterizzati da differenti masse volumiche, il calcolo della composizione deve essere pesato in funzione delle specifiche densità di ciascuna frazione granulometrica.

3.2.4 – Mix design

Si riporta ora nel dettaglio il mix design relativo a ciascuna miscelazione, utile per il prosieguo della presente attività sperimentale. La caratteristica che differenzia ciascuna miscelazione risiede nell'impiego di percentuali differenti di materiale recuperato da circuiti stampati (PCB). Quest'ultimo, come già precisato nella descrizione dei materiali (§2.4) presenta una massa volumica di $1,887 \text{ g}/\text{cm}^3$, dunque diversa dal filler tradizionale ($2,66 \text{ g}/\text{cm}^3$). Tenuto presente di questa differenza nell'aggiunta di materiale di recupero, si può notare come l'1% in volume di sostituzione di filler tradizionale, corrisponde allo 0,7% in peso di materiale di recupero. Tale valore è stato ricavato facendo il rapporto tra le masse volumiche dei due materiali. Particolare attenzione è rivolta all'ultima miscelazione (H-0.4), dove si è deciso di cambiare approccio, sostituendo parzialmente il materiale di recupero alla frazione di sabbia, oltre che al materiale di riempimento (filler). Per quanto riguarda il legante impiegato, il contenuto totale è il 5,3% in peso rispetto alla miscela (in riferimento al Capitolato Anas per lo strato di binder). Il fresato è stato sottoposto a prove di estrazione del bitume invecchiato residuo, attraverso due ripetizioni effettuate. Il contenuto di bitume riferito al peso degli aggregati è risultato pari all'8,2% in massa. Una volta ricavata la quantità di bitume contenuta nel fresato e tenuta in considerazione la percentuale d'impiego di quest'ultimo (30%), è stata determinata l'esatta quantità di bitume vergine da aggiungere durante la miscelazione, al fine di ottenere il contenuto ottimale di legante previsto dal mix design:

- **% bitume contenuto nel fresato rispetto agli aggregati 8,2%;**
- **% bitume contenuta nel fresato = $0,30 * 8,2\% = 2,46\%$;**
- **% bitume vergine di aggiunta = $5,3\% - 2,46\% = 2,84\%$.**

Nelle tabelle sottostanti (Tab. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6), si riporta nel dettaglio il mix design relativo a ciascuna miscelazione.

H-0-REF					
	MVA Aggregati		% di utiliz % di utilizzo		
	ρ_a		ρ_a	rispetto	ρ_a/ρ_a
	[g/cm ³]		[%]	a miscela	[g/cm ³]
Pietrisco 12/20	2,650	20	20	19,448	7,339
Graniglia 7/12	2,610	20	20	19,447686	7,451
Sabbia 0/4	2,600	26	26	25,281991	9,724
RAP 0/8 (aggregati estratti)	2,650	30	27,54	26,779463	10,105
Filler	2,660	4	4	3,8895371	1,462
				0	
Filler riciclato (FR)	1,877		0	0	0,000
			MVA Mix		
Bit. aggiunto (agg)	1,03		2,84	2,76	2,681
Bit. estrazione 0/8 (agg)	1,03	8,2			
Bit. da 0/8 (agg)	1,03		2,460	2,39	2,322
			102,840	100,0	41,1
Bit. totale (agg)	[%]		5,3		
Filler riciclato (agg)			0		
Massa volumica FR	[g/cm ³]		1,877		
Massa Volumica Max (Mate)	[g/cm ³]		2,434		

Tab. 3.3 – *Mix design prima miscelazione (H-0)*

H-0.1					
	MVA Aggregati		% di utilizzo		
	ρ_a		ρ_a	rispetto a miscela	ρ_a/ρ_a [g/cm ³]
	[g/cm ³]		[%]		
Pietrisco 12/20	2,650	20	20	19,506	7,361
Graniglia 7/12	2,610	20	20	19,505915	7,474
Sabbia 0/4	2,600	26	26	25,35769	9,753
RAP 0/8 (aggregati estratti)	2,650	30	27,54	26,859645	10,136
Filler	2,660	3	3	2,9258873	1,100
Filler riciclato (FR)	1,877		0,693	0,67588	0,360
			MVA Mix		
Bit. aggiunto (agg)	1,03		2,84	2,77	2,689
Bit. estrazione 0/8 (agg)	1,03	8,2			
Bit. da 0/8 (agg)	1,03		2,460	2,40	2,329
			102,533	100,0	41,2
Bit. totale (agg)	[%]		5,3		
Filler riciclato (agg)			0,7		
Massa volumica FR	[g/cm ³]		1,877		
Massa Volumica Max (Mater)	[g/cm ³]		2,427		

Tab. 3.4 – *Mix design seconda miscelazione (H-0.1)*

H-0.2					
	MVA Aggregati		% di utiliz % di utilizzo		
	ρ_s [g/cm ³]		ρ_s [%]	rispetto a miscela	ρ_s/ρ_a [g/cm ³]
Pietrisco 12/20	2,650	20	20	19,567	7,384
Graniglia 7/12	2,610	20	20	19,567174	7,497
Sabbia 0/4	2,600	26	26	25,437326	9,784
RAP 0/8 (aggregati estratti)	2,650	30	27,54	26,943999	10,168
Filler	2,660	2	2	1,9567174	0,736
Filler riciclato (FR)	1,877		1,372	1,3423081	0,715
			MVA Mix		
Bit. aggiunto (agg)	1,03		2,84	2,78	2,698
Bit. estrazione 0/8 (agg)	1,03	8,2			
Bit. da 0/8 (agg)	1,03		2,460	2,41	2,337
			102,212	100,0	41,3
Bit. totale (agg)	[%]		5,3		
Filler riciclato (agg)			1,4		
Massa volumica FR	[g/cm ³]		1,877		
Massa Volumica Max (Mater)	[g/cm ³]		2,420		

Tab. 3.5 – Mix design terza miscelazione (H-0.2)

H-0.4					
	MVA Aggregati		% di utiliz % di utilizzo		
	ρ_s [g/cm ³]		ρ_s [%]	rispetto a miscela	ρ_s/ρ_a [g/cm ³]
Pietrisco 12/20	2,650	20	20	19,464	7,345
Graniglia 7/12	2,610	20	20	19,463603	7,457
Sabbia 0/4	2,600	24,1	24,1	23,453641	9,021
RAP 0/8 (aggregati estratti)	2,650	30	27,54	26,801381	10,114
Filler	2,660	3	3	2,9195404	1,098
Filler riciclato (FR)	1,877		2,8159	2,7403779	1,460
			MVA Mix		
Bit. aggiunto (agg)	1,03		2,84	2,76	2,683
Bit. estrazione 0/8 (agg)	1,03	8,2			
Bit. da 0/8 (agg)	1,03		2,460	2,39	2,324
			102,756	100,0	41,5
Bit. totale (agg)	[%]		5,3		
Filler riciclato (agg)			2,9		
Massa volumica FR	[g/cm ³]		1,877		
Massa Volumica Max (Mater)	[g/cm ³]		2,410		

Tab. 3.6 – Mix design quarta miscelazione (H-0.4)

Dai valori del mix design sopra indicati, nelle tabelle sottostanti (Tab. 3.7, 3.8, 3.9, 3.10), si riportano i quantitativi di utilizzo di ciascuna frazione all'interno della miscela. In particolare, nelle prime tre miscelazioni si è ottenuto un quantitativo totale dei materiali pari a 17 Kg, mentre nell'ultima miscelazione di 19 Kg.

Quantitativi materiali per miscelazione (H-0)		
	[g]	[%]
Pietrisco 12/20	3400	20
Pietrisco 7/12	3400	20
Sabbia Calcareo	4420	26
Graulato RA 0/8	5100	30
Filler	680	4
Tot. Aggregati	17000	100
		[%]
Bit. vergine (agg)	482,8	2,84
Bit. da 0/8 (agg)	418,2	2,46
Fibre		
Bit. Tot. (agg)		5,3
Bit. Tot. (mix)		5,03
Bit. Estrazione 0/8 (agg)		8,2

Tab. 3.7 – Quantitativi materiali miscela H-0

Quantitativi materiali per miscelazione (H-0.1)			
	[g]	[%]	
Pietrisco 12/20	3400	20	
Pietrisco 7/12	3400	20	
Sabbia Calcareo	4420	26	
Graulato RA 0/8	5100	30	
Filler	510	3	
FR	119	1	
Tot. Aggregati	17000	100	16949
			[%]
Bit. vergine (agg)	481,4	2,84	Bit. Estrazione 0/8 (agg)
Bit. da 0/8 (agg)	418,2	2,46	8,2
Fibre			
Bit. Tot. (agg)		5,3	
Bit. Tot. (mix)		5,03	

Tab. 3.8 – Quantitativi materiali miscela H-0.1

Quantitativi materiali per miscelazione (H-0.2)			
	[g]	[%]	
Pietrisco 12/20	3400	20	
Pietrisco 7/12	3400	20	
Sabbia Calcareo	4420	26	
Graulato RA 0/8	5100	30	
Filler	340	2	
FR	238	2	
Tot. Aggregati	17000	100	16898
			[%]
Bit. vergine (agg)	479,9	2,84	Bit. Estrazio 8,2
Bit. da 0/8 (agg)	418,2	2,46	
Fibre			
Bit. Tot. (agg)		5,3	
Bit. Tot. (mix)		5,03	

Tab. 3.9 – Quantitativi materiali miscela H-0.2

Quantitativi materiali per miscelazione (H-0.4)			
	[g]	[%]	
Pietrisco 12/20	3800	20,0	
Pietrisco 7/12	3800	20,0	
Sabbia Calcareo	4579	24,1	
Graulato RA 0/8	5700	30,0	
Filler	570	3,0	
FR	551	2,9	
Tot. Aggregati	19000	100	19000
			[%]
Bit. vergine (agg)	539,6	2,84	Bit. Estrazione 0/ 8,2
Bit. da 0/8 (agg)	467,4	2,46	
Fibre			
Bit. Tot. (agg)		5,3	
Bit. Tot. (mix)		5,03	

Tab. 3.10 – Quantitativi materiali miscela H-0.4

3.2.5 – Miscelazione

Una volta giunti in laboratorio, gli aggregati vergini e riciclati, insieme al filler, vengono stesi su delle teglie di laboratorio e lasciati riposare per qualche giorno. Successivamente, i materiali vengono pesati rispettando le quantità previste (Tabelle 3.7, 3.8, 3.9, 3.10). Prima di procedere con la miscelazione, gli aggregati vergini e il filler sono stati posti in forno a 150°C per circa tre ore, e alla stessa temperatura è stato scaldato il bitume, per un tempo di circa due ore e trenta minuti per garantirne la lavorabilità. Quanto al RAP e al materiale di recupero, vengono posti in forno a 40°C, per circa trenta minuti. Il miscelatore meccanico utilizzato per tutti gli impasti è costituito da una tazza di miscelazione metallica, che ha la funzione di contenere i materiali,

e un corpo motore che gestisce la rotazione di tre pale metalliche miscelatrici (Fig. 3.6). Tramite un display laterale è possibile avviare e/o arrestare la miscelazione e selezionare la temperatura del miscelatore. Per la sperimentazione condotta è stato necessario preriscaldare l'apparecchiatura a 150°C, con almeno un'ora di anticipo rispetto all'inizio effettivo delle miscelazioni.



Fig. 3.6 – *Miscelatore meccanico*

La miscelazione procede attraverso le seguenti fasi:

- Inserimento degli aggregati vergini e di riciclo caldi all'interno del miscelatore e avvio del primo programma per trenta secondi (Figura 3.7);
- Apertura del miscelatore e inserimento del bitume stradale tradizionale (Figura 3.8), attivazione del miscelatore tramite il secondo programma per centoventi secondi;
- Riapertura e aggiunta del filler (Figura 3.9), opportunamente sparso all'interno, e ulteriore miscelazione attraverso il secondo programma per centottanta secondi.

Nella prima miscelazione di riferimento (H-0) non si impiega il materiale di recupero, ma questo viene inserito all'interno del miscelatore solo per le successive miscelazioni. Precisamente, nella seconda e terza miscelazione (H-0.1, H-0.2) il materiale di recupero viene trattato come materiale di riempimento e, per questo, inserito nell'ultimo ciclo di centottanta secondi insieme al filler tradizionale. Nell'ultima miscelazione (H-0.4) invece, viene introdotto insieme agli aggregati sin dal primo ciclo, il quale è stato appositamente aumentato a sessanta secondi, più precisamente si inserisce trascorsi i primi trenta secondi, dal momento che viene sostituito parzialmente anche alla frazione di sabbia. Si sottolinea che l'inserimento del bitume

avviene tramite la tecnica della pesata per differenza. Cioè si inizia scaldando una quantità maggiore rispetto a quella strettamente necessaria, al fine di compensare la quota parte che rimarrebbe aderente alle pareti del contenitore. Tale tecnica consiste nel posizionare sopra una bilancia la lattina di bitume impiegato (priva di tappo) e impostare lo zero. A questo punto, a ogni versamento del bitume all'interno della tazza di miscelazione si pesa nuovamente la lattina, leggendo così ogni volta un peso negativo, corrispondente al peso introdotto nella miscela. Si ripete l'operazione fino a ottenere il valore corretto nella bilancia (con il segno meno) previsto dal mix design.



Fig. 3.7 – *Inserimento degli aggregati*



Fig. 3.8 – *Inserimento del bitume*



Fig. 3.9 – *Inserimento del filler*

3.2.6 – Determinazione della massa dei provini per la compattazione

Terminata l'ultima fase di miscelazione viene aperto il coperchio del macchinario e si ripartisce il materiale per il confezionamento dei provini (questo per tutte e quattro le miscele prodotte). Per quanto riguarda il porzionamento, viene seguita la procedura standardizzata UNI EN 12697-31:2019 [21]. La massa del conglomerato prodotto, da introdurre nella fustella all'interno della pressa giratoria, deve essere determinata utilizzando la massa volumica massima, determinata con il procedimento matematico suggerito dalla normativa UNI EN 12697-5:2008 [22] (procedura illustrata nel dettaglio nel seguito dell'elaborato) e indicata nelle tabelle riportate sopra, relative al mix design della miscela (§3.2.2). Nella formula si considera inoltre, l'altezza minima del provino compattato, corrispondente alla percentuale di vuoti pari al 4%. In particolare, assunti: un diametro della fustella pari a 100 mm (comune a tutti i provini), un'altezza minima di 70 mm (per i provini COMP) e di 60 mm (per i provini ITS e ITSr), la formula per il calcolo della massa risulta la seguente:

$$M = 10^{-3} \pi \frac{D^2}{4} h_{\min} \rho_M$$

Dove:

- M è la massa di una miscela asciutta da introdurre nello stampo, in grammi;
- D è il diametro interno dello stampo, in millimetri;
- $h_{\min}$ è l'altezza minima del provino compattato, in millimetri;
- ρ_m è la massa volumica massima della miscela, in $[g/cm^3]$.

Nelle tabelle 3.11 e 3.12 riportate di seguito vengono mostrate le masse ottenute tramite la formula precedentemente illustrata e il numero di provini minimo per le prove fisico-meccaniche eseguite nella presente attività sperimentale.

Provini per compattabilità Pressa Giratoria 100 mm			
D	[mm]		100,0
h	[mm]		70,0
Vvuoti,medi	[%]		4,0
ρ_{max}	[g/cm ³]		2,434
V	[cm ³]		549,8
ρ_{app}	[g/cm ³]		2,337
m	[g]		1350,0
		Compattabilità	
n° provini	[-]	3	

Tab. 3.11 – *Massa provini COMP*

Provini per ITS e ITSr Pressa Giratoria 100 mm			
D	[mm]		100,0
h	[mm]		60,0
Vvuoti,medi	[%]		4,0
ρ_{max}	[g/cm ³]		2,434
V	[cm ³]		471,2
ρ_{app}	[g/cm ³]		2,337
m	[g]		1094,0
		ITS	ITSr
n° provini	[-]	4	6
			0

Tab. 3.12 – *Massa provini ITS e ITSr*

Ultimata la miscelazione, viene prelevata la quantità di conglomerato bituminoso riportato nelle tabelle soprastanti, opportunamente pesato tramite una bilancia (Figura 3.10). La procedura viene ripetuta per il numero di provini necessari. Prima di procedere con la compattazione, il materiale precedentemente posto in diverse teglie (Figura 3.11), viene mantenuto in forno alla temperatura di 140°C per circa un'ora.



Fig. 3.10 – *Conglomerato bituminoso pesato dopo la miscelazione*



Fig. 3.11 – *Conglomerato bituminoso prodotto posizionato in teglie*

3.2.7 – Compattazione e confezionamento dei provini

In accordo con la normativa UNI EN 12697-31:2019 [21], l'apparecchiatura utilizzata per il confezionamento dei provini cilindrici in conglomerato bituminoso è la pressa a taglio giratoria (Fig. 3.12). Tale macchinario è costituito da un telaio di carico dove, nella parte superiore è presente un pistone che imprime al materiale inserito nella fustella una pressione costante di 600 kPa. Nella parte inferiore invece, è presente una base che ruota a 30 rpm ed è inclinata di 1,25°, generando sollecitazioni tangenziali che permettono l'addensamento del provino. A questo punto, si posiziona al di sopra della base rotante la fustella metallica di diametro 100

mm, contenente il conglomerato bituminoso caldo (Figura 3.13). La fustella in questione (Figura 3.14) è costituita da: due tappi metallici inferiori di spessore 38 mm e una piastra metallica superiore, che permette di imprimere una pressione omogenea sul materiale mediante il pistone di carico. Nella Figura 3.15 viene illustrato nel dettaglio, un provino estratto dalla fustella al termine della prova.



Fig. 3.12 – *Pressa giratoria Gyrocomp*



Fig. 3.13 – *Conglomerato caldo inserito nella fustella*



Fig. 3.14 – *Fustella diametro 100 mm e spessore interno 38 mm*



Fig. 3.15 – *Provino estratto dalla fustella*

Attraverso la configurazione appena descritta dell'apparecchiatura è possibile simulare la compattazione che in sito avverrebbe con i rulli grazie all'azione combinata di sollecitazioni normali (indotte dal pistone) e tangenziali (indotte dalla combinazione della rotazione e dell'inclinazione dell'asse del provino).

La pressa a taglio giratoria opera secondo due differenti modalità di compattazione: ad altezza imposta oppure a giri imposti. Nella sperimentazione oggetto di studio si considera solamente quella a giri imposti, variando il numero di giri in funzione del campione esaminato. La procedura consiste nel posizionare un disco di carta sul fondo della fustella, al fine di evitare l'adesione del conglomerato caldo sulla piastra. Successivamente, si inserisce il materiale nella fustella, facendo pressione con una spatola metallica per evitare che i granuli più grossi

emergano in superficie. Si adagia quindi un altro disco di carta nella parte superiore e una piastra metallica. Si procede posizionando la fustella all'interno della pressa giratoria, si chiude lo sportello e si aziona il macchinario da remoto mediante il computer posto nelle vicinanze. Il programma registra l'altezza e la densità del provino a ogni rotazione e mostra graficamente l'andamento della curva. Trascorso il tempo necessario per la compattazione, è possibile aprire lo sportello e prelevare il provino, ponendolo lateralmente, così che con un'apposita manovella meccanica si blocca la fustella nella parte inferiore e si spinge il provino verso l'alto. Una volta estratto, si rimuovono entrambi i dischi di carta posizionati preventivamente nelle due estremità.

Nella sperimentazione oggetto di studio, sono stati prodotte le seguenti tipologie di provini:

- A giri imposti (180 giri), massa provini 1350 grammi, per la valutazione dell'indice di compattabilità (CEI);
- A giri imposti (180 giri), massa provini 1094 grammi, per la prova di rottura a trazione indiretta (ITS) e (CTI);
- A giri imposti (50 giri), massa provini 1094 grammi, per la prova di rottura a trazione indiretta (ITS) e per valutare la suscettibilità all'acqua (ITSR).

Una volta raffreddati, è possibile valutare la caratterizzazione fisico-meccanica dei provini attraverso le procedure di laboratorio descritte nel dettaglio nel seguito dell'elaborato. Le figure sottostanti (3.16, 3.17, 3.18, 3.19) mostrano i provini prodotti dalle quattro diverse miscele precedentemente descritte.



Fig. 3.16 – *Provini H-0*

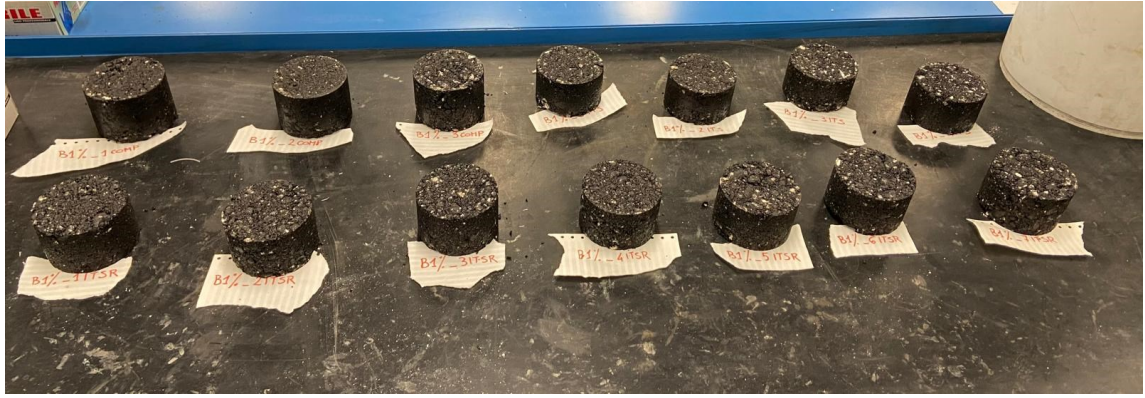


Fig. 3.17 – *Provini H-0.1*



Fig. 3.18 – *Provini H-0.2*

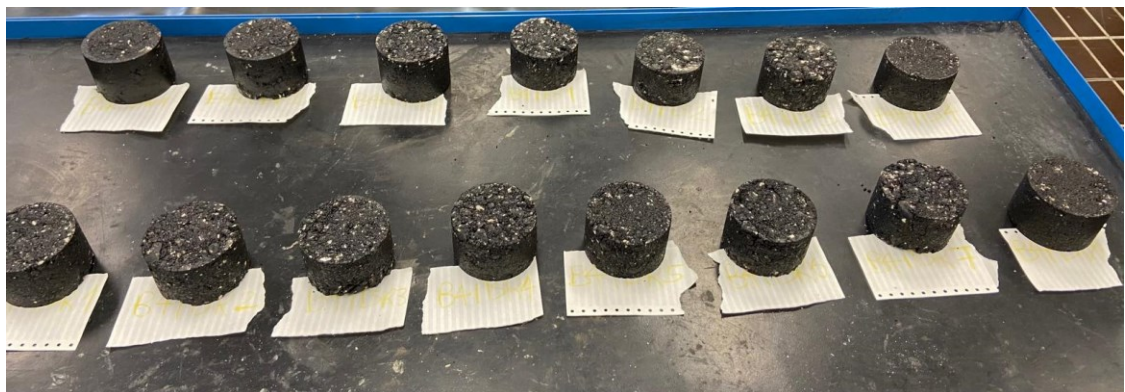


Fig. 3.19 – *Provini H-0.4*

3.3 – Determinazione delle proprietà volumetriche

Secondo quanto riportato dalla normativa europea UNI EN 12697-8:2019 [23], il volume totale della miscela si compone di: aggregati, bitume e vuoti secondo le proporzioni riportate nella Fig. 3.20 sottostante [23]. Le proprietà volumetriche della miscela hanno un ruolo determinante nel comportamento meccanico e nella durabilità in esercizio del conglomerato bituminoso.

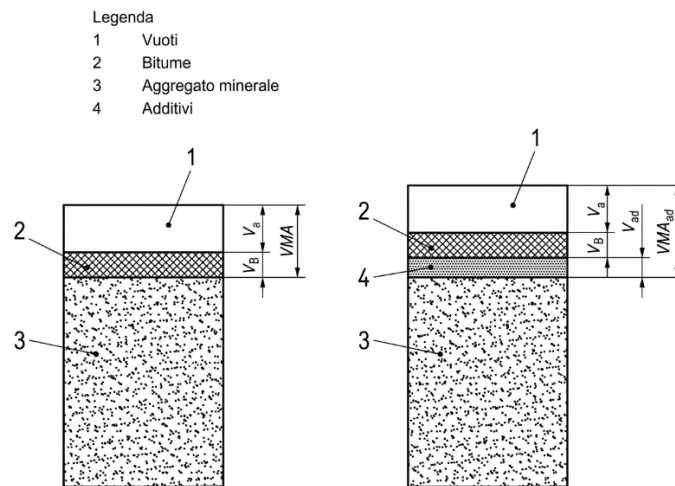


Fig.3.20 – Componenti della miscela

Al fine di determinare le proprietà volumetriche dei provini, si è reso necessario valutare: la massa volumica massima, la massa volumica apparente e il volume dei vuoti.

3.3.1 – Determinazione della massa volumica apparente dei provini

Per massa volumica apparente si intende la massa per volume unitario (inclusi i vuoti d'aria) di un provino a una prefissata temperatura. La normativa UNI EN 12697-6:2012 [24] descrive le quattro modalità attraverso le quali è possibile determinare questa grandezza: la massa volumica apparente secca (ρ_{dry}), con superficie satura asciutta (ρ_{SSD}), con provino sigillato (ρ_{sea}) e la massa volumica apparente geometrica (ρ_{geom}). Nelle prime tre modalità si pesa il campione in aria e se ne calcola il volume attraverso pesate in acqua (Principio di Archimede). L'ultima invece, sfrutta esclusivamente le dimensioni note del provino per la determinazione del volume. Le procedure utilizzate nella presente sperimentazione sono quella secca, quella con superficie satura asciutta e quella geometrica, attraverso cui viene calcolato il volume dei vuoti. I risultati ottenuti vengono poi confrontati con il riferimento tecnico Capitolato Anas.

Al fine di valutare le proprietà volumetriche dei provini prodotti, questi ultimi sono stati pesati su di una bilancia idrostatica, ottenendo quattro differenti valori in grammi:

- m_1 relativo alla massa secca del provino (Figura 3.21);
- m_2 relativo alla massa del provino immerso in acqua a temperatura controllata (Figura 3.22);
- m_3 relativo alla massa del provino immerso in acqua, dopo che si è lasciato riposare per trenta minuti all'interno di una bacinella d'acqua a temperatura nota;
- m_4 relativo alla massa del provino con superficie satura asciutta, cioè asciugati i bordi e le superfici con un panno di laboratorio.

Tramite un calibro digitale (Figura 3.23), viene misurata l'altezza di ciascun provino lungo i quattro assi, in modo tale da ottenere uno spessore medio, utile per determinare il volume dei vuoti e la resistenza a trazione indiretta (ITS).



Fig. 3.21 – Provino su bilancia idrostatica (m_1)



Fig. 3.22 – *Massa provino su cestello (m_2)*



Fig. 3.23 – *Determinazione altezza dei provini*

3.3.1.1 – Procedimento dry

In accordo a quanto riportato nella normativa UNI EN 12697-6:2012 [24], la massa volumica apparente secca (*dry*) determinata mediante il procedimento (A), deve essere calcolata come segue:

$$\rho_{\text{bdry}} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w$$

Dove:

- ρ_{bdry} è la massa volumica apparente secca, [g/cm³];
- m_1 è la massa secca del provino, calcolata in grammi;
- m_2 è la massa del provino immerso in acqua, calcolata in grammi;
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, [g/cm³].

3.3.1.2 – Procedimento geometrico

Sempre come riportato dalla normativa UNI EN 12697-6:2012 [24], la massa volumica apparente determinata mediante il procedimento geometrico (D) deve essere calcolata, sfruttando le dimensioni note del provino, come segue:

$$\rho_{\text{bdim}} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3$$

Dove:

- ρ_{bdim} è la massa volumica apparente geometrica, [g/cm³];
- m_1 è la massa secca del provino, calcolata in grammi;
- h è lo spessore medio del provino, in millimetri;
- d è il diametro del provino, in millimetri.

3.3.1.3 – Procedimento SSD (superficie satura asciutta)

Si riporta inoltre, la formula per il calcolo della massa volumica apparente ottenuta mediante il procedimento (B) con superficie satura asciutta (SSD), in accordo alla normativa UNI EN 12697-6: 2012 [24].

$$\rho_{\text{bssd}} = \frac{m_1}{m_4 - m_3} \times \rho_w$$

Dove:

- ρ_{bssd} è la massa volumica apparente con superficie satura asciutta, [g/cm³];
- m_1 è la massa secca del provino, calcolata in grammi;
- m_3 è la massa del provino immerso in acqua, calcolata in grammi;
- m_4 è la massa del provino in condizioni SSD, calcolata in grammi.

3.4 – Determinazione del volume dei vuoti

In accordo con la normativa UNI EN 12697-8:2019 [23], il contenuto di vuoti d'aria di un provino bituminoso è determinato a partire dal rapporto tra la massa volumica massima della miscela e la massa volumica apparente del provino. Grazie alla formula sotto riportata, sono stati calcolati quindi distinti valori di vuoti, differenziati in funzione delle procedure sperimentali adottate per la determinazione della massa volumica massima della miscela (§3.3.1) e quella apparente del provino (§3.3.2).

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

Dove:

- V_m è il contenuto di vuoti d'aria del provino bituminoso, in percentuale;
- ρ_m è la massa volumica massima della miscela, [g/cm³];
- ρ_b è la massa volumica apparente del provino, [g/cm³].

I risultati ottenuti devono risultare conformi ai requisiti tecnici prescritti dal Capitolato Anas, il quale stabilisce limiti ben precisi riguardo il contenuto dei vuoti a diversi livelli di compattazione della miscela (Tab. 3.13).

Riferimento tecnico - Capitolato ANAS_Rev.8 (2025)	
Requisiti ANAS per compattazione-collegamento tradizionale	V _m [%]
N ₁ = 10	11-15
N ₂ = 100	3-6
N ₃ = 180	≥2

Tab. 3.13 – Limiti dei vuoti Capitolato Anas

Dove: N₁, N₂, N₃, corrispondono a specifici gradi di compattazione riferiti ai numeri di giri della pressa giratoria (10, 100 e 180).

3.5 – Determinazione della compattabilità

Lo studio della compattabilità è stato analizzato attraverso il parametro CEI (*Compaction Energy Index*). Tale indice, insieme alla percentuale di vuoti, risulta rappresentativo per la valutazione della capacità di addensamento delle miscele bituminose. Inoltre, il CEI corrisponde al lavoro svolto dal rullo compattatore in sito per addensare la miscela fino al raggiungimento della densità richiesta prima dell'apertura al traffico. Ai fini del calcolo, riportando la curva di compattazione con il grado di addensamento in funzione del numero di rotazioni, l'indice CEI risulta essere l'area sottesa a tale curva (Figura 3.24) a partire dall'ottava rotazione fino al raggiungimento del 92% del grado di compattazione finale (%G_{mm,max}). I due limiti risultano rappresentativi del comportamento in sito: infatti, il limite inferiore (otto rotazioni) è stato selezionato al fine di simulare lo sforzo applicato durante le operazioni di stesa da una tipica macchina vibrofinitrice, mentre il limite superiore (corrispondente ad un grado di compattazione finale del 92%) simula la densità raggiunta al termine della costruzione della pavimentazione, prima che questa sia aperta al transito e subisca quindi un ulteriore addensamento dovuto ai carichi del traffico. Nella normativa non sono riportati particolari limiti, sebbene si preferiscano miscele con bassi valori del CEI, in quanto, a queste condizioni, si evidenziano migliori caratteristiche di compattabilità come, ad esempio, minore sforzo ed energia di compattazione richiesti. Allo stesso modo, si sconsigliano valori troppo ridotti, in quanto potrebbero rappresentare miscele cedevoli. Attraverso la pressa a taglio giratoria è

possibile determinare le caratteristiche di addensamento finale delle miscele studiate, grazie all'aiuto delle curve di compattazione, ricavate dai dati registrati in continuo (altezza del campione e numero di rotazioni) durante il graduale addensamento del materiale. Il grado di compattazione registrato, calcolato come segue, risulta il complemento a cento del volume dei vuoti.

$$\%G_{mm} = 100 - V_a = 100 - \frac{\rho_m - \rho_{app}}{\rho_m} \cdot 100 = \frac{\rho_{app}}{\rho_m} \cdot 100$$

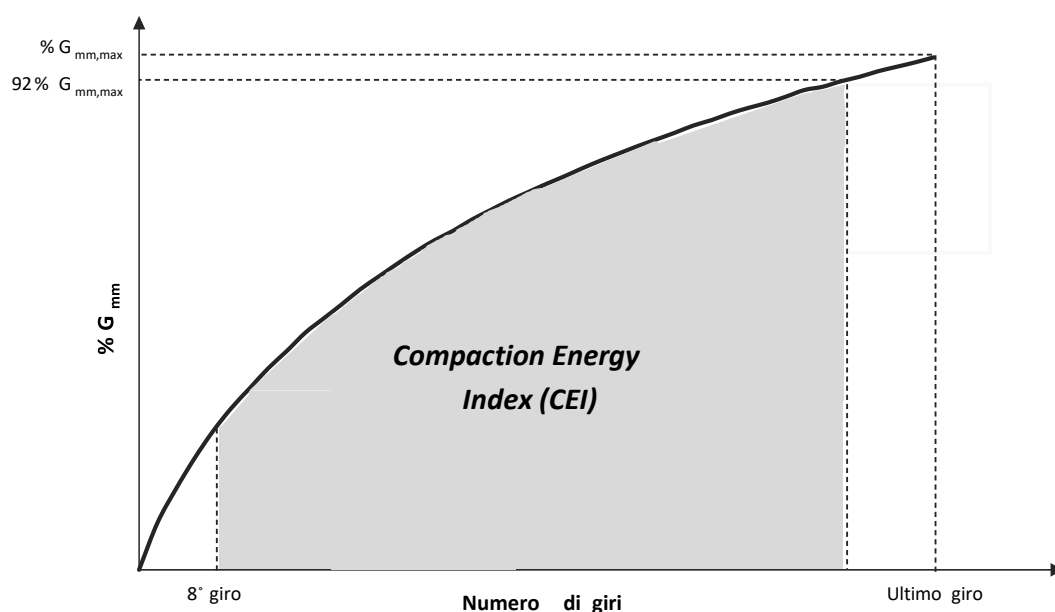


Fig. 3.24 – *Indice CEI*

3.6 – Condizionamento dei provini

I provini realizzati vengono opportunamente condizionati, per un certo periodo di tempo, al fine di valutare l'influenza dell'acqua sul conglomerato. Per ogni miscela è stato ricavato il numero minimo di provini da sottoporre alla prova di trazione indiretta: quattro provini ITS ottenuti a 180 giri della pressa e almeno sei provini ITSR ottenuti a 50 giri. Prima di eseguire le prove, i provini ITS sono stati condizionati in camera climatica a 25°C, mentre i provini ITSR sono stati selezionati in modo tale che alcuni fossero sottoposti a condizionamento *wet* (in condizioni bagnate), mentre i rimanenti a condizionamento *dry* (in condizioni asciutte). Per valutare la metodologia di condizionamento utilizzata, specificatamente illustrata nei paragrafi sottostanti, i provini sono stati suddivisi in due gruppi, prendendo in considerazione la percentuale di vuoti geometrici di ciascun gruppo, in modo tale che la media dei vuoti risultasse paragonabile.

3.6.1 – Condizionamento wet

Secondo quanto riportato nella normativa UNI EN 12697-12:2018 [25] metodologia A, prima di procedere al condizionamento in ambiente umido (*wet*), i provini opportunamente selezionati vengono collocati all'interno di una campana di vetro, al fine di favorire l'evacuazione dell'aria intrappolata nei pori del materiale. A tale scopo, viene applicato attraverso una valvola un vuoto parziale (Figura 3.25), corrispondente a una pressione residua di circa 6 kPa, mantenuto per un intervallo temporale di trenta minuti. Trascorso tale intervallo, si gira gradualmente la valvola per arrestare la pressione residua applicata e i provini si lasciano riposare all'interno della campana per altri trenta minuti. Quindi, si può procedere a tale condizionamento che consiste nel posizionare i provini in acqua per un certo periodo di tempo e a una determinata temperatura. Questo, secondo la normativa di riferimento UNI EN 12697-12:2018 [25] e, nel caso oggetto di studio, i provini vengono inseriti in bagno termostatico con acqua a 40°C, per circa settantadue ore. Una volta raggiunta la temperatura richiesta nel bagno termostatico, preventivamente impostata, i provini vengono immersi (Figura 3.26) e viene accesa istantaneamente la pompa che permette il ricircolo dell'acqua, in modo tale da rendere la temperatura omogenea. Trascorse le settantadue ore, i provini vengono prelevati dal bagno termostatico e posizionati all'interno di una camera climatica a 25°C per almeno 3 ore, al fine di portarli alla temperatura di prova.

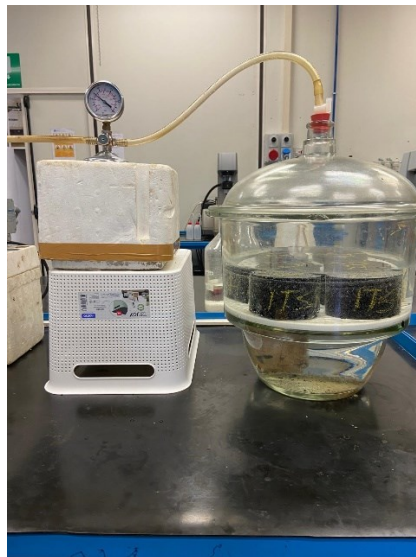


Fig. 3.25 – Configurazione del vuoto applicato ai provini



Fig. 3.26 – *Provini immersi in bagno termostatico*

3.6.2 – Condizionamento dry

Il condizionamento dry invece, consiste nel posizionare semplicemente i provini in una camera climatica a una certa temperatura prima di eseguire le prove. Nel caso oggetto di studio, i provini selezionati sono stati condizionati prima in una camera climatica a 20°C, poi trasferiti all'interno di un'altra camera a 25°C per almeno tre ore (Figura 3.27).



Fig. 3.27 – *Condizionamento provini in camera climatica*

3.7 – Prova di rottura a trazione indiretta

Il parametro ITS (*Indirect Tensile Strength*), ricavato dalla prova di rottura a trazione indiretta, è definito dalla normativa UNI EN 12697-23:2018 [26] come la massima tensione di trazione calcolata dal carico di picco applicata a un provino cilindrico caricato diametralmente fino a rottura, alle condizioni di prova specificate. L'importanza di tale indice si riscontra nella qualità e accettabilità delle miscele. Il protocollo prevede che la prova venga eseguita a una temperatura compresa tra i 5 e 25°C. Come descritto in precedenza, i provini vengono condizionati in camera climatica a 25°C. L'apparecchiatura di prova prevede: un sistema di carico dato da due piatti paralleli infinitamente rigidi, due listelli di larghezza 15 ± 2 mm, spessore 4 ± 1 mm e lunghezza maggiore della zona di contatto con il provino, il tutto al fine di applicare le opportune sollecitazioni. Il provino deve essere posizionato correttamente al centro dell'apparecchiatura, in modo tale che il suo asse sia orizzontale, l'asse del listello superiore risulti parallelo a quello inferiore e che entrambi risultino contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino. Di seguito, viene illustrato quanto riportato dalla normativa UNI EN 12697-23:2018 [26] riguardo l'apparecchiatura di prova (Fig. 3.28).

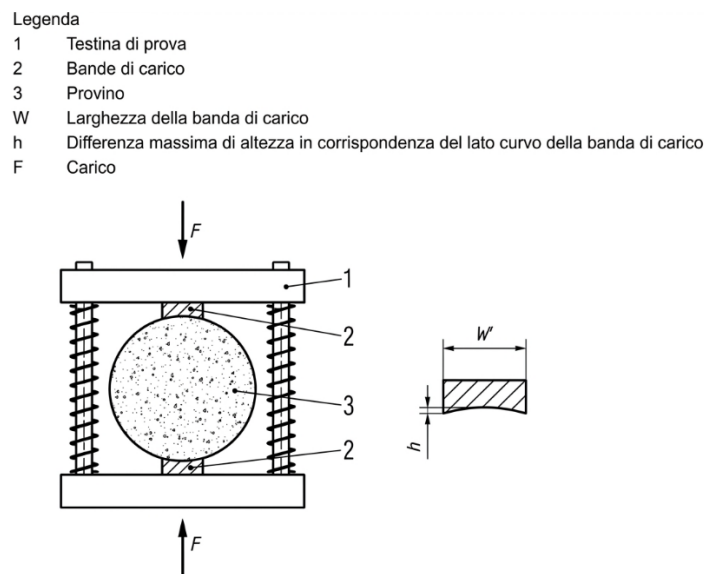


Fig. 3.28 – Allestimento prova ITS

La testa di carico avanza a una velocità costante pari a 50 ± 2 mm/min fino a rottura. Il software *Controls*, gestito da remoto, registra lo spostamento e il carico. In accordo con

quanto riportato dalla normativa UNI EN 12697-23:2018 [26], si classificano tre tipologie di rottura (Fig. 3.29):

- a. **chiara rottura per trazione:** provino chiaramente rotto lungo una linea diametrale, con un'eventuale eccezione per piccole sezioni triangolari vicino alle bande di carico;
- b. **deformazione:** provini senza una linea di rottura per trazione chiaramente visibile;
- c. **combinazione:** provini con una linea di rottura per trazione limitata e vaste aree deformate vicino alle bande di carico.

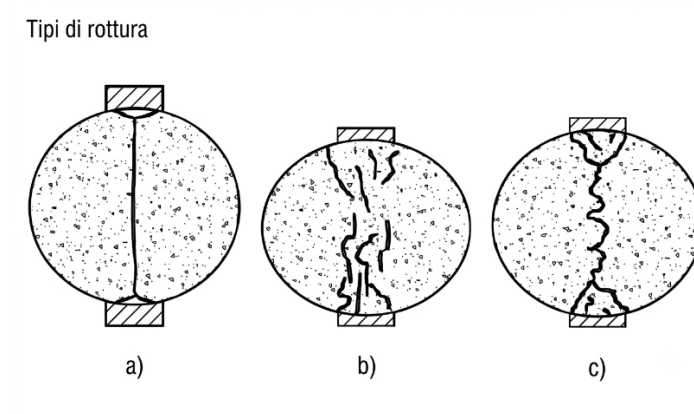


Fig. 3.29 – Tipologie di rottura

Impostando da remoto: il diametro del provino e l'altezza, il software è in grado di individuare la curva carico-spostamento e il carico di rottura a compressione (P_{max}). Per ciascun provino viene quindi calcolata la resistenza a trazione indiretta (ITS), con la formula seguente:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \times 1000$$

Dove:

- ITS è la resistenza a trazione indiretta, espressa in KiloPascal;
- P è il carico di picco, espresso in Newton;
- D è il diametro del provino, espresso in millimetri;
- H è l'altezza media del provino, espressa in millimetri.

Per quanto riguarda la precisione dei risultati ottenuti, la normativa UNI EN 12697-23:2018 [26] specifica che i valori sono accettabili se la differenza nella resistenza a trazione indiretta sui singoli provini (risultati parziali) non risulta maggiore del 17% del valore medio. Nelle figure sottostanti vengono mostrati il posizionamento (Fig. 3.30), l'effetto della trazione

indiretta su un provino (Fig. 3.31) e la curva carico-spostamento registrata dal software (Fig. 3.32).

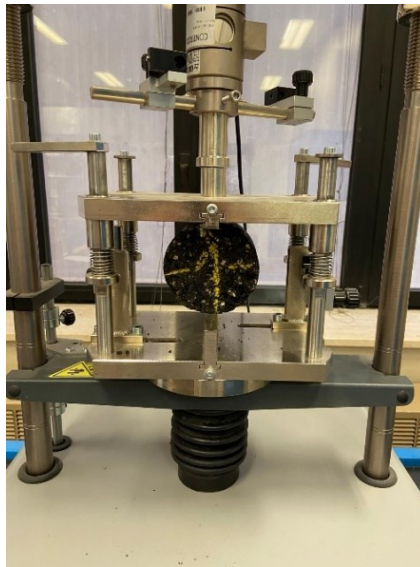


Fig. 3.30 – *Posizionamento provino per determinare ITS*



Fig. 3.31 – *Provino rotto con la prova a trazione indiretta*



Fig. 3.32 – Curva carico-spostamento registrata dal software

Come imposto dal Capitolato Anas (2025), sono previsti dettagliati limiti riguardo i valori dell'indice ITS calcolato sui provini compattati a 180 giri (Tab. 3.14). In particolare, il Capitolato specifica che nel caso in cui la miscela venga riscaldata, tali limiti devono essere incrementati del 50%.

Riferimento tecnico - Capitolato ANAS_Rev.8 (2025)	
Requisiti ANAS per resistenza	ITS [MPa] @25°C
$N_3 = 180$	0,80 - 1,90

Tab. 3.14 – Limiti ITS Capitolato Anas

3.7.1 – Coefficiente di trazione indiretta (CTI)

Il coefficiente di trazione indiretta (CTI) è un parametro meccanico che valuta la duttilità e la resistenza alla fessurazione dei conglomerati bituminosi. Si ottiene dai risultati della prova a trazione indiretta, come riportato nella normativa UNI EN 12697-23:2018 [26], rapportando la resistenza massima alla deformazione a rottura. Il calcolo si riporta nella formula seguente:

$$CTI = \frac{\pi \cdot D \cdot ITS}{2 \cdot dv}$$

Dove:

- CTI è il coefficiente di trazione indiretta, espresso in MegaPascal;
- ITS è la resistenza a trazione indiretta, espressa in MegaPascal;
- D è il diametro del provino, espresso in millimetri;
- d_v è la deformazione verticale a rottura del provino, espressa in millimetri.

Tale parametro è di fondamentale importanza nel valutare la flessibilità e tenacità del materiale; infatti, un CTI più elevato indica una miscela meno fragile, capace di subire maggiori deformazioni prima di rompersi. Allo stesso modo, insieme all'indice ITS, consente di valutare la resistenza a fatica. Infatti, è un requisito fondamentale al fine di prevenire la formazione di buche e fessurazioni da carico o da sbalzi termici. Il Capitolato tecnico Anas (2025) specifica un limite ben preciso, in accordo ai requisiti di resistenza da verificare a N₃ (180 giri della pressa), nelle procedure tradizionali di compattazione e collegamento di miscele bituminose, come può notare nella Tabella 3.15.

Riferimento tecnico - Capitolato ANAS_Rev.8 (2025)	
Requisiti ANAS per resistenza	CTI [Mpa]
N3 = 180	≥70

Tab. 3.15 – Limite CTI Capitolato Anas

3.7.2 – Suscettibilità all'acqua

Calcolando i valori medi dell'indice ITS, sia dei provini *wet* sia di quelli *dry*, è possibile stabilire la suscettibilità all'acqua di tali provini tramite il rapporto di resistenza a trazione indiretta (ITSR). Quest'ultimo è definito dalla normativa UNI EN 12697-12:2018 [25] come il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta dei provini condizionati in acqua (*wet*) e quella dei provini condizionati a secco (*dry*), espresso in percentuale.

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

Dove:

- ITSR è la resistenza a trazione indiretta, in percentuale;
- ITS_w è la resistenza a trazione indiretta media del gruppo bagnato, in KiloPascal;
- ITS_d è la resistenza a trazione indiretta media del gruppo asciutto, in KiloPascal.

Come si può notare nella Tabella 3.16, il riferimento tecnico del Capitolato Anas (2025) fissa un valore limite di tale indice (ITSR) solo per lo strato di usura. Nella presente attività sperimentale si assume tale soglia anche per lo strato di binder in merito ai requisiti di resistenza da valutare a N_3 (180 giri della pressa).

Riferimento tecnico - Capitolato ANAS_Rev.8 (2025)	
Requisiti ANAS per resistenza	ITSR [%]
$N_3 = 180$	≥ 80 (solo su USURA)

Tab. 3.16 – *Limite ITSR Capitolato Anas*

CAPITOLO 4 – ANALISI DEI RISULTATI

In questa sezione dell'elaborato si illustrano nel dettaglio i risultati ottenuti dalle procedure di laboratorio precedentemente descritte. Si ricorda che la caratterizzazione fisico-meccanica relativa a ogni miscela viene effettuata mediante le seguenti prove: valutazione della compattabilità (vuoti residui e CEI), valutazione della resistenza a trazione indiretta e del coefficiente di trazione indiretta (ITS e CTI) e di suscettibilità all'acqua (ITSR). All'interno del presente capitolo vengono presentati dei grafici, che costituiscono uno strumento di supporto per l'analisi dei risultati sperimentali, consentendo una rapida valutazione comparativa sia tra i provini realizzati con la stessa miscela, sia tra quelli ottenuti da miscele differenti. Per ogni provino esaminato con le prove meccaniche, viene inoltre riportata la relativa percentuale di vuoti. Quindi, si analizza la fattibilità tecnico-operativa nell'impiego di materiale di recupero proveniente da circuiti stampati (PCB), all'interno di miscele di conglomerato bituminoso previste per la realizzazione di strati di binder. Ai fini della valutazione dei risultati ottenuti, questi si confrontano sia con la miscela di riferimento (H-0), che con le altre miscele caratterizzate da diverse percentuali di tale materiale di recupero (H-0.1, H-0.2, H-0.4).

4.1 – Studio della compattabilità

Nella valutazione del volume dei vuoti (§3.4), in accordo alla formula riportata dalla normativa UNI EN 12697-8:2019 [23], si utilizza la massa volumica massima della miscela calcolata con il procedimento volumetrico (§3.2.3.1) in rapporto alla massa volumica apparente del provino determinata con il procedimento geometrico (§3.3.1.2). Precisamente, si è calcolata la massa volumica massima della miscela di riferimento (H-0) mediante il procedimento volumetrico, invece riguardo le altre miscele, contenenti materiale di recupero (PCB), tale procedimento volumetrico non ha fornito risultati attendibili, dal momento che la differenza tra le due ripetizioni effettuate è risultata non accettabile. Considerato questo esito, si è ritenuto opportuno calcolare la massa volumica massima attraverso un criterio di proporzionalità (Tab. 4.1), partendo dalla massa volumica massima matematica (illustrata precedentemente nella fase di mix design §3.2.4), confrontata con la massa volumica massima calcolata con procedimento volumetrico della miscela di riferimento. Infatti, tali assunzioni consentono di ottenere risultati più realistici e idonei ai fini della caratterizzazione fisico-meccanica. Nei grafici sottostanti si illustra nel dettaglio il confronto tra i provini delle diverse miscele realizzate in termini di vuoti. Vengono inoltre riportati i limiti in accordo a quanto stabilito dalle specifiche tecniche del Capitolato Anas (2025), relative allo strato di binder (Tab. 3.13).

	Massa volumica max (matematica)	Massa volumica massima
H-0	2,434	2,456
H-0.1	2,427	2,449
H-0.2	2,420	2,442
H-0.4	2,410	2,431

Tab. 4.1 – *Massa volumica massima delle miscele*

4.1.1 – Analisi dei vuoti dei provini COMP

La valutazione del volume dei vuoti dei provini COMP può essere condotta a partire dai dati ottenuti dalla pressa a taglio giratoria; infatti, come precedentemente spiegato (§3.5), l'apparecchiatura consente di ricavare la curva di compattazione dai dati registrati in continuo, i quali forniscono a ogni rotazione l'altezza del campione, durante il graduale addensamento del materiale. Dalla formula precedentemente illustrata (§3.5), si evince come il grado di compattazione registrato risulti essere il complemento a cento del volume dei vuoti. Perciò, noto il grado di compattazione registrato in continuo dalla pressa, è possibile ricavare dalla formula inversa anche il volume dei vuoti a ogni rotazione. Di particolare interesse risultano rispettivamente i vuoti a 10, 100 e 180 rotazioni, dal momento che il Capitolo Anas fissa specifici limiti a riguardo, come riportato in precedenza (Tab. 3.13). A tal proposito, si determinano i vuoti per i provini COMP e si confrontano i risultati delle miscele realizzate. Le linee tratteggiate visibili nei grafici sottostanti rappresentano i limiti imposti dal Capitolo (Figure 4.1, 4.2, 4.3). In particolare, come si può intuire, i vuoti maggiori si registrano dopo dieci giri della pressa, nella fase iniziale di addensamento del conglomerato.

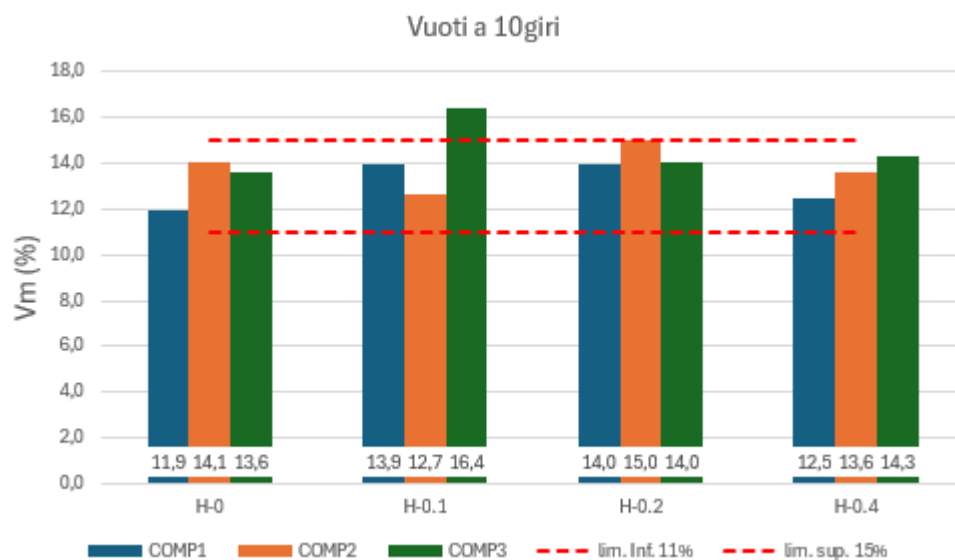


Fig. 4.1 – Vuoti provini COMP a 10 giri della pressa

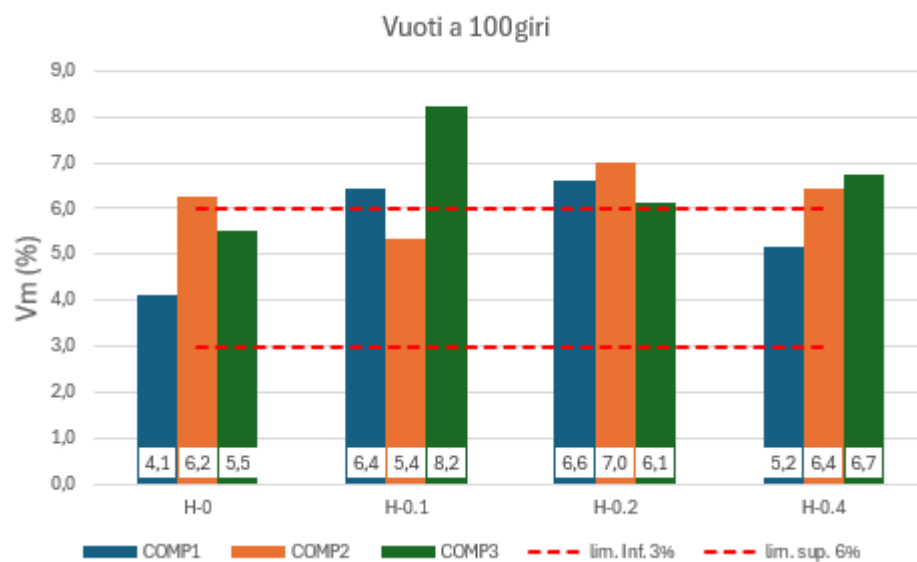


Fig. 4.2 – Vuoti provini COMP a 100 giri della pressa

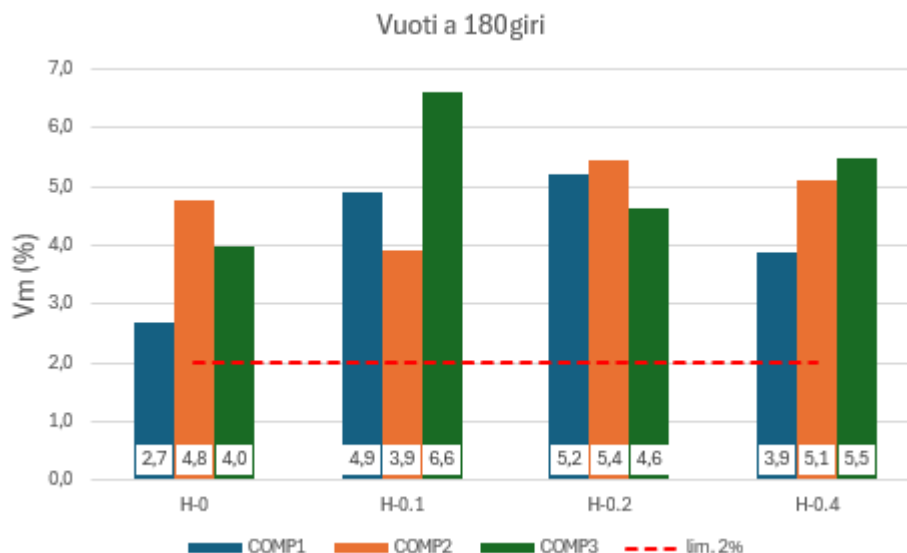


Fig. 4.3 – Vuoti provini COMP a 180 giri della pressa

Al fine di effettuare un confronto omogeneo tra le diverse miscele prodotte, si è ritenuto opportuno considerare il valore medio del contenuto di vuoti calcolato sui tre provini COMP, ricavati dopo 10, 100 e 180 giri della pressa. I risultati sono ritenuti conformi solo quando il contenuto di vuoti è coerente con la soglia prevista dal Capitolato tecnico Anas per lo strato di binder (Tabella 3.13), con riferimento ai requisiti da verificare su provini compattati mediante pressa giratoria (linee rosse tratteggiate riportata in Fig. 4.4). Nel dettaglio, nella Figura 4.4 sottostante si può notare un aumento del contenuto medio dei vuoti nelle miscele caratterizzate dal materiale di recupero (H-0.1, H-0.2 e H-0.4), nei confronti della miscela di riferimento (H-0). Inoltre, nell'ultima miscelazione (H-0.4), dove si è deciso di sostituire parzialmente il materiale di recupero (PCB) anche alla frazione di sabbia, si riscontra una moderata riduzione del contenuto medio di vuoti rispetto alla miscelazione precedente (H-0.2). Ad ogni modo, tenuto presente di queste considerazioni, solamente a 10 e 180 giri tutte e quattro le miscele analizzate risultano conformi ai limiti imposti dal Capitolato. Invece, a 100 giri, le miscele contenenti PCB registrano un contenuto medio dei vuoti superiore alla soglia prevista.

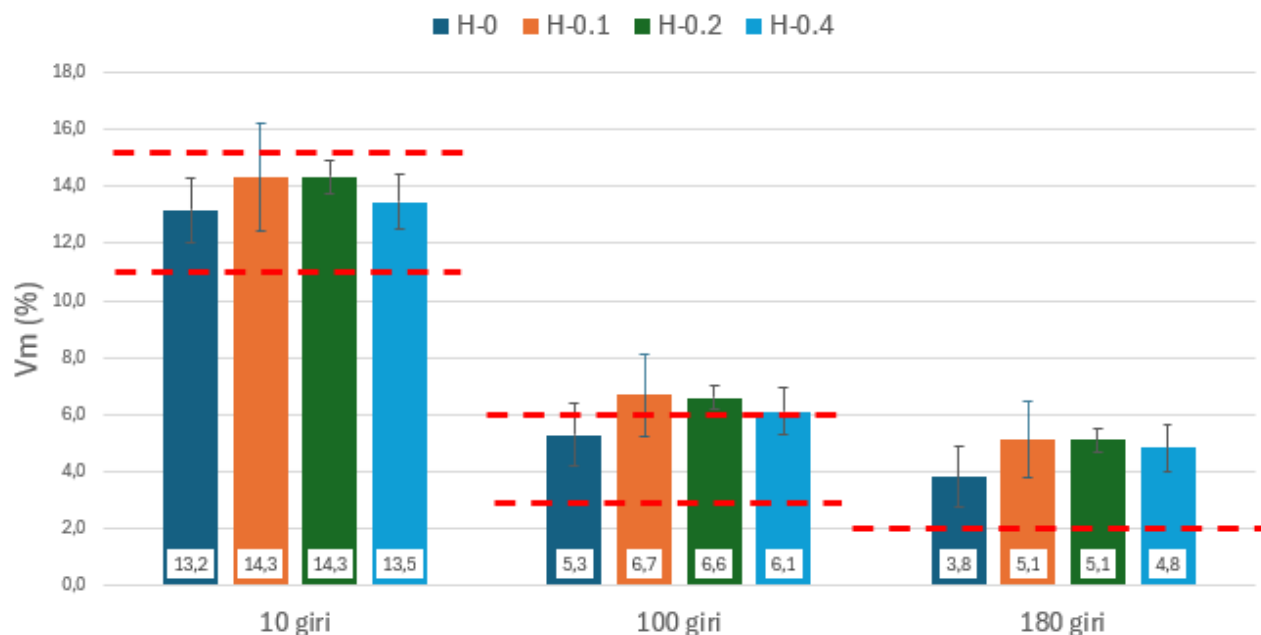


Fig. 4.4 – Confronto dei vuoti provini COMP tra le miscele

4.1.2 – Analisi del CEI dei provini COMP

La valutazione della compattabilità delle miscele realizzate viene analizzata attraverso il parametro CEI (*Compaction Energy Index*). Come riportato in precedenza (§3.5), tale indice, insieme alla percentuale di vuoti, risulta rappresentativo per la valutazione della capacità di addensamento delle miscele bituminose. Si ricorda come non siano previsti particolari limiti in normativa, sebbene si preferiscano miscele con bassi valori del CEI, in quanto mostrano migliori caratteristiche di compattabilità. Ad ogni modo, si sconsigliano valori troppo ridotti, in quanto potrebbero rappresentare miscele deboli. Grazie all’ausilio della pressa a taglio giratoria è possibile ottenere tale indice, riportando i dati relativi all’altezza del provino in corrispondenza del numero di rotazioni. Attraverso un foglio di calcolo Excel, si inseriscono opportunamente i seguenti valori: la massa secca del provino (m_1), la massa volumica massima della miscela (in g/cm^3), il diametro interno della fustella utilizzata (100 mm), il riferimento iniziale (ottava rotazione), il riferimento finale (92% del grado di compattazione) e lo spessore medio del provino (in mm). Dunque, il CEI si ottiene come somma della graduale compattazione del materiale. Nelle figure sottostanti, si illustrano i risultati ottenuti di tale indice riguardo i provini COMP (Figure 4.5, 4.6, 4.7, 4.8).

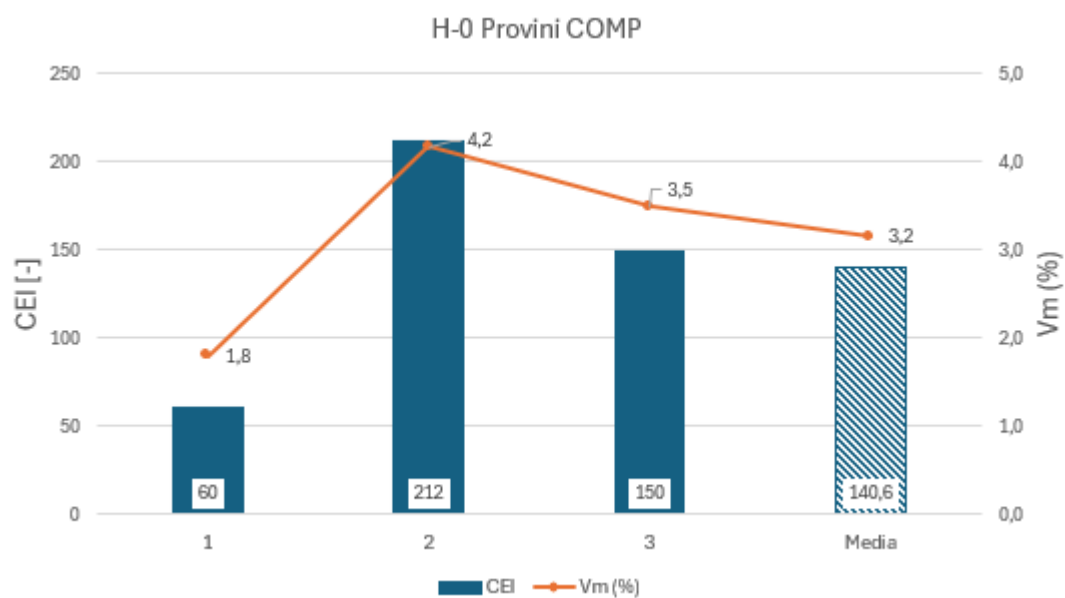


Fig. 4.5 – Indice CEI provini COMP miscela H-0

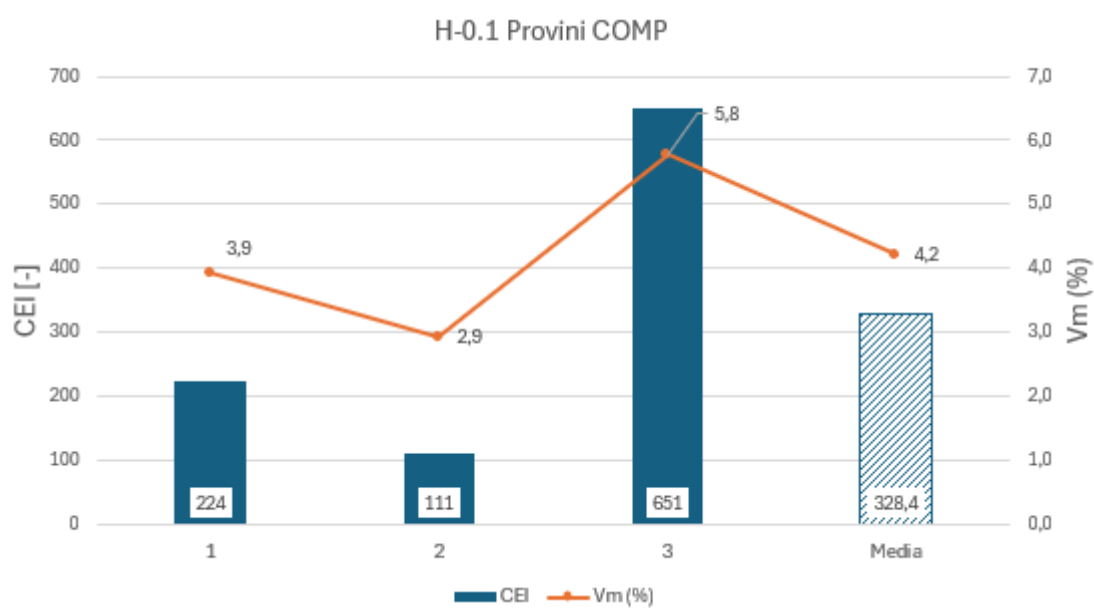


Fig. 4.6 – Indice CEI provini COMP miscela H-0.1

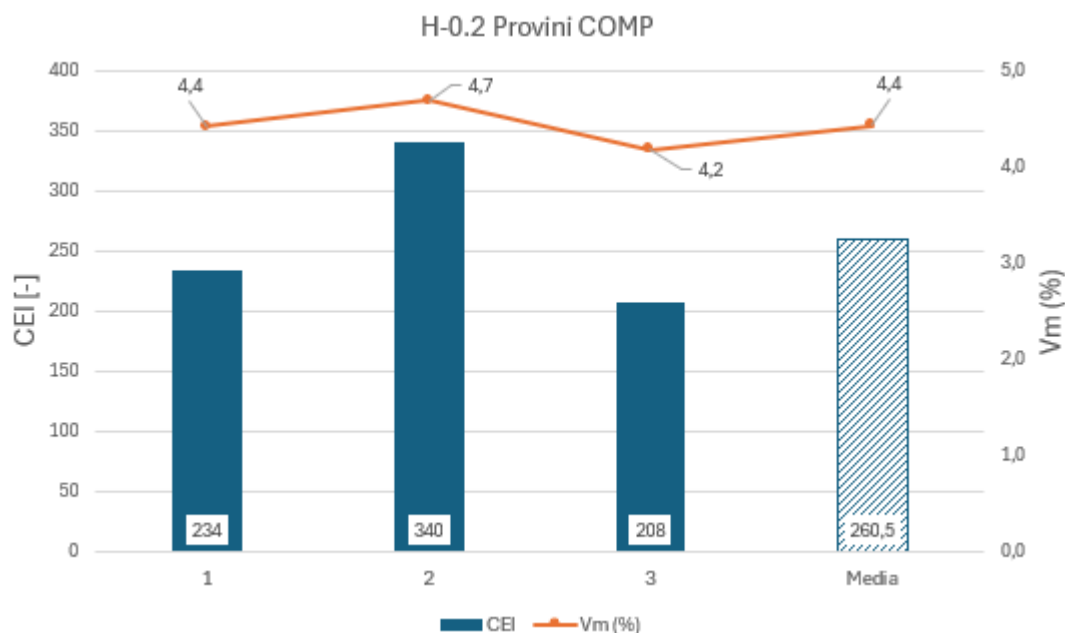


Fig. 4.7 – *Indice CEI provini COMP miscela H-0.2*

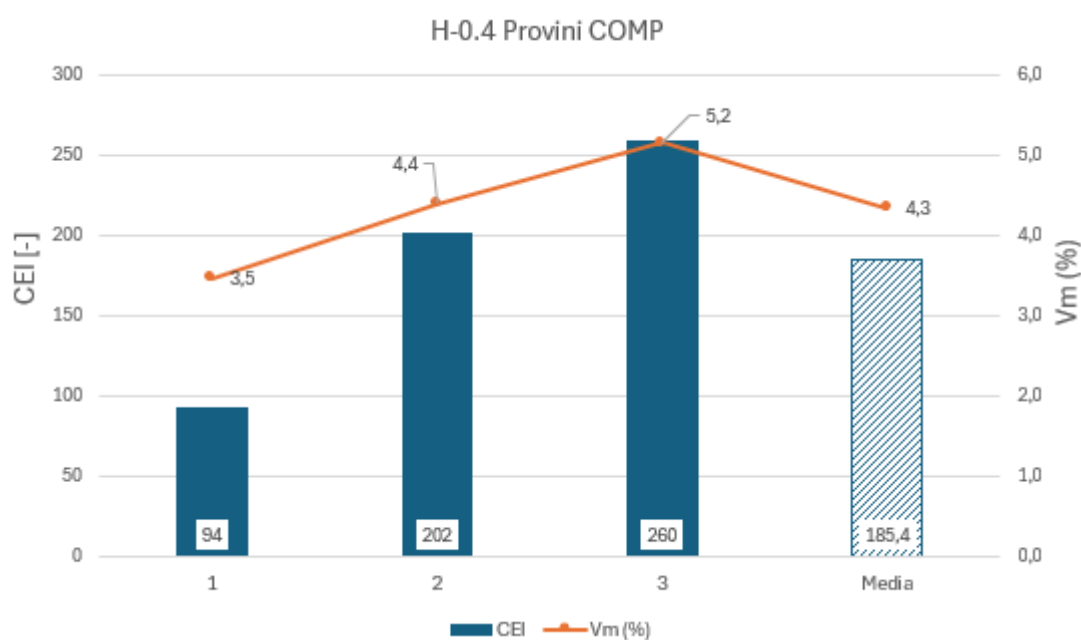


Fig. 4.8 – *Indice CEI provini COMP miscela H-0.4*

Al fine di ricavare un confronto dell'indice CEI con le diverse miscele realizzate, si ritiene opportuno considerare i valori medi dei tre provini COMP. In particolare, riguardo la miscela di riferimento (H-0) e quella con l'1% di materiale di recupero (H-0.1), si è ritenuto opportuno scartare i valori che risultano poco attendibili, e quindi influenzano la media finale dei campioni (H-0 COMP1, H-0.1 COMP3). Nel grafico, oltre ai valori dell'indice CEI viene riportato anche il contenuto dei vuoti medi, ricavati mediante il procedimento geometrico sui provini

compattati, determinati in precedenza. Dall'analisi della Figura 4.9 sottostante, emerge come non risultano differenze significative dell'indice CEI, rispetto alla miscela di riferimento (H-0). Precisamente, come si può vedere, solo nella miscela contenente il 2% di PCB (H-0.2), si registra un apprezzabile aumento del CEI. Tale esito è dovuto principalmente alla riduzione del materiale di riempimento (filler) e al parallelo aumento del materiale di recupero. Questo si traduce in uno svantaggio dal punto di vista operativo, dal momento che saranno richiesti maggiore sforzo ed energia di compattazione per raggiungere lo stesso stato di addensamento. Solo nell'ultima miscelazione (H-0.4), in cui il PCB è stato sostituito parzialmente anche alla frazione di sabbia, modificando quindi la granulometria della miscela, risulta una moderata riduzione del CEI, tornando ad un valore paragonabile alla miscela di riferimento. Inoltre, come già enunciato, il contenuto medio dei vuoti geometrici nei provini COMP risulta aumentato nelle miscele caratterizzate dall'introduzione del materiale di recupero. Tale esito influenza negativamente le caratteristiche di addensamento delle miscele prodotte, dal momento che si evidenzia una maggiore porosità.

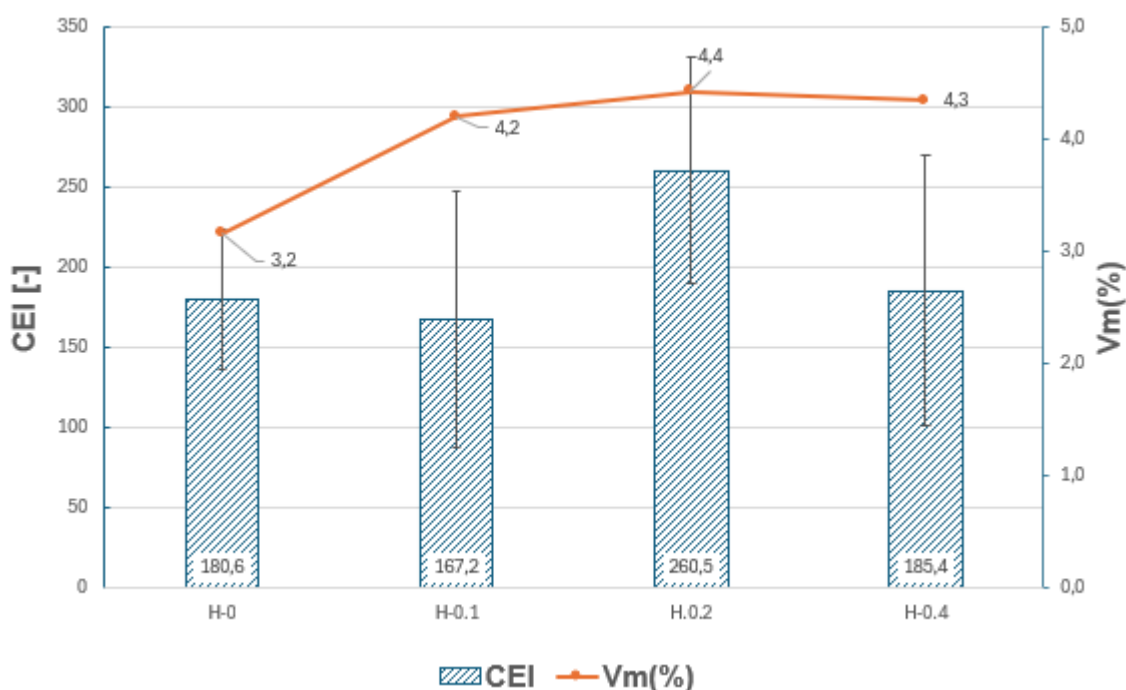


Fig. 4.9 – Confronto indice CEI provini COMP

4.1.3 – Analisi dei vuoti dei provini ITS

Di seguito si illustrano i risultati riguardo il contenuto dei vuoti nei provini ITS.

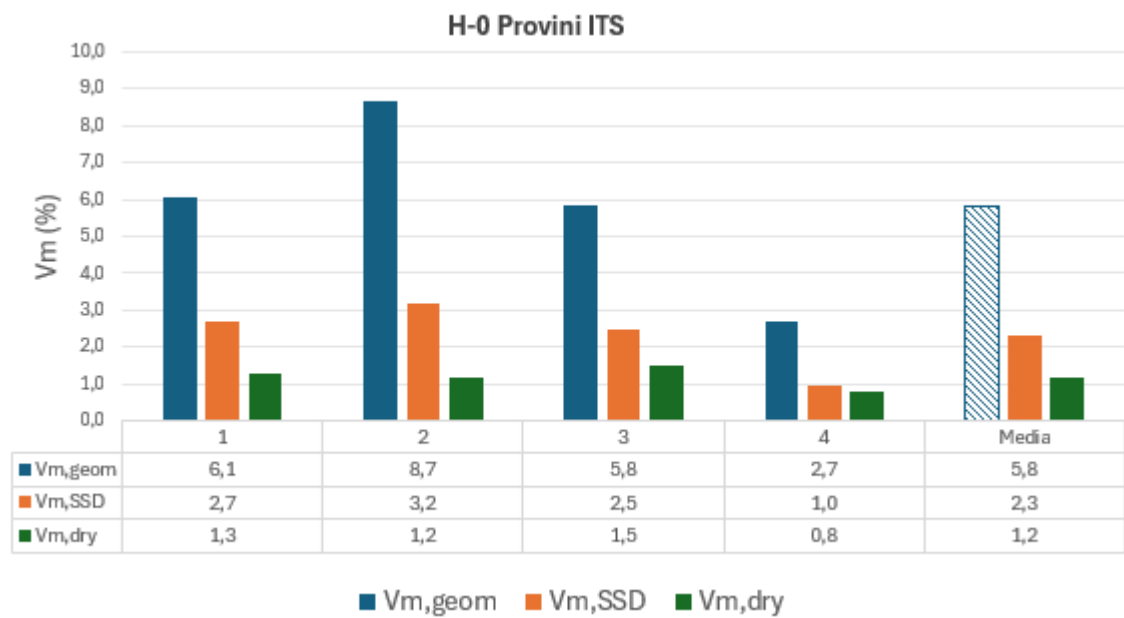


Fig. 4.10 – Vuoti miscela H-0 provini ITS

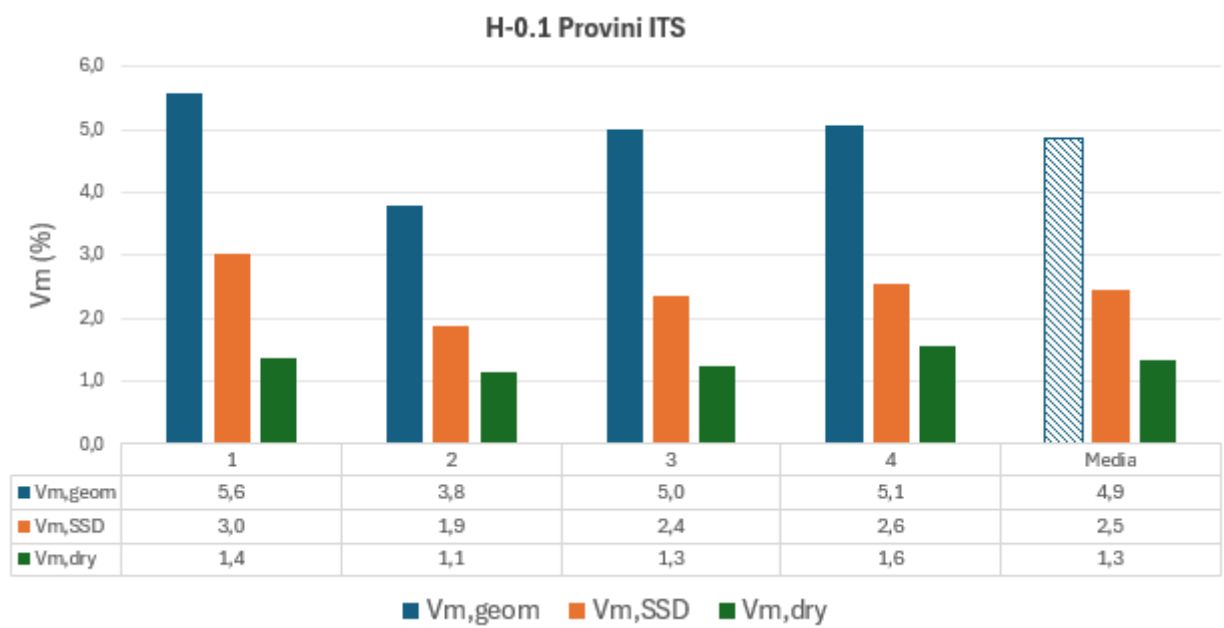


Fig. 4.11 – Vuoti miscela H-0.1 provini ITS

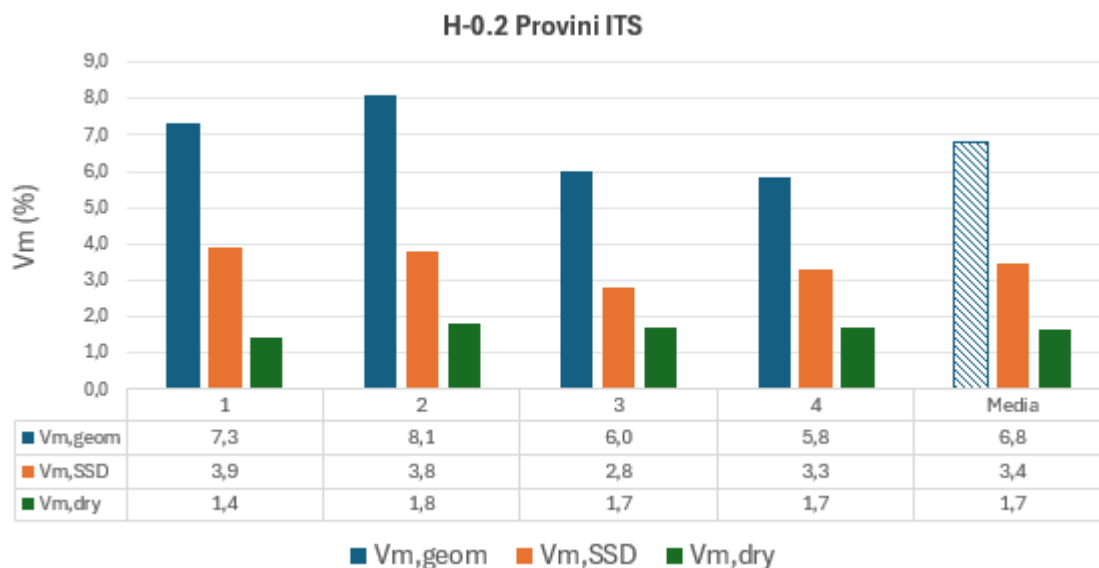


Fig. 4.12 – Vuoti miscela H-0.2 provini ITS

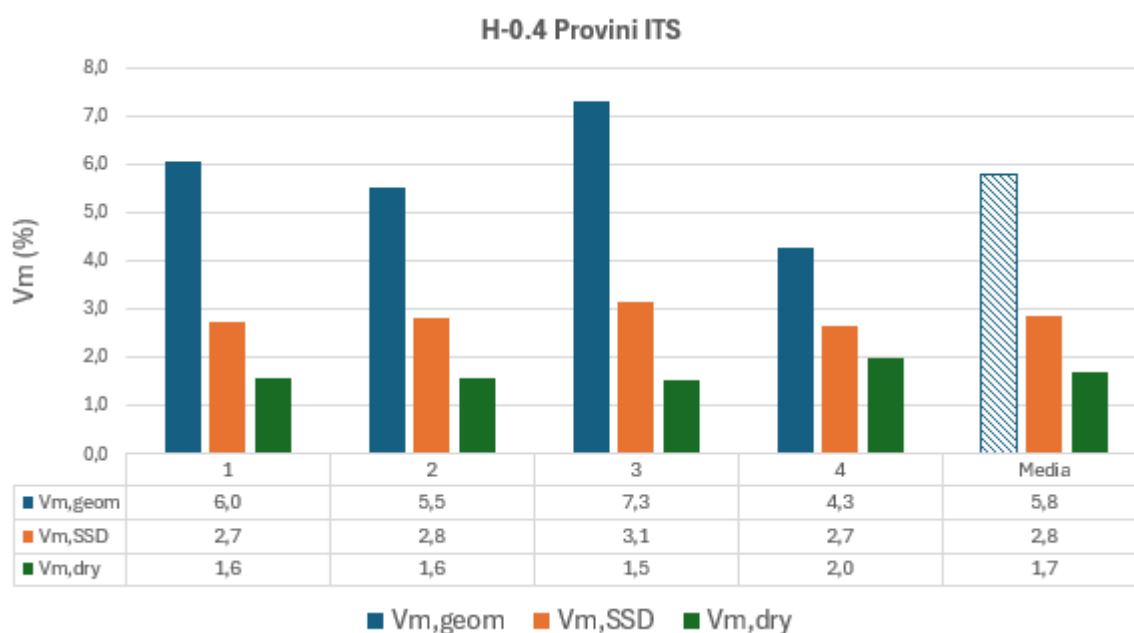


Fig. 4.13 – Vuoti miscela H-0.4 provini ITS

Alla luce di una prima valutazione preliminare emerge che i valori dei vuoti ottenuti attraverso il procedimento geometrico ($V_{m,geom}$) risultano sistematicamente maggiori di quelli ottenuti mediante le altre procedure. Dunque, per un confronto rappresentativo tra le diverse miscele, si è ritenuto opportuno considerare il valore medio dei quattro provini ITS, ottenuto con tale procedimento. La soglia limite prevista, considerato che tali provini sono stati realizzati a 180 giri della pressa è la medesima di quanto stabilito precedentemente (linea tratteggiata rossa in Figura 4.14), secondo quanto riportato all'interno delle specifiche tecniche del Capitolato Anas

(Tabella 3.13). In questo caso si può osservare però, come nella percentuale dei vuoti delle miscele contenenti materiale di recupero (H-0.1, H-0.2, H-0.4) non risultino differenze rilevanti a confronto della miscela di riferimento (H-0). Dall'analisi della Figura 4.14, si evince come il limite minimo fissato dal Capitolato (2%) sia ampiamente soddisfatto. Dunque, si può affermare che l'aggiunta di diverse percentuali di PCB non alteri significativamente le proprietà volumetriche dei provini analizzati.

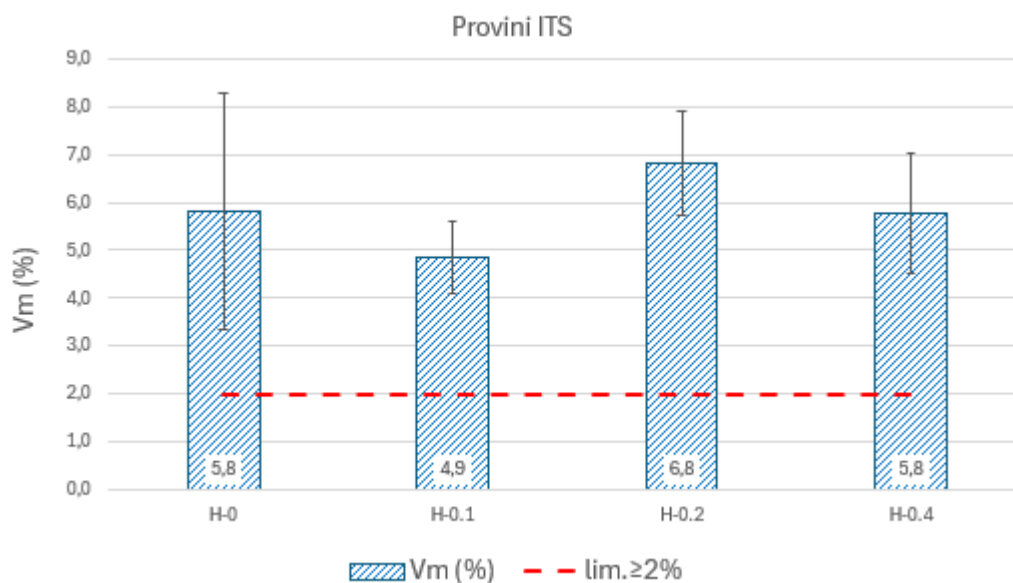


Fig. 4.14 – Confronto dei vuoti provini ITS tra le miscele

4.1.4 – Analisi dei vuoti dei provini ITSR

Anche per i provini ITSR si valuta il contenuto dei vuoti, come illustrato nelle figure sottostanti.

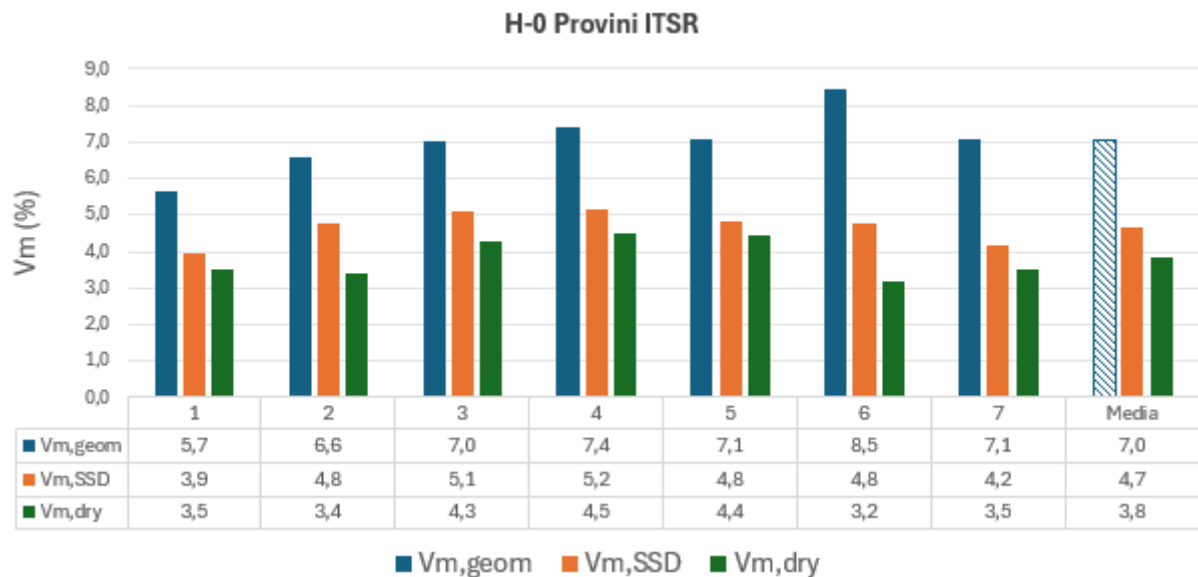


Fig. 4.15 – Vuoti miscela H-0 provini ITSr

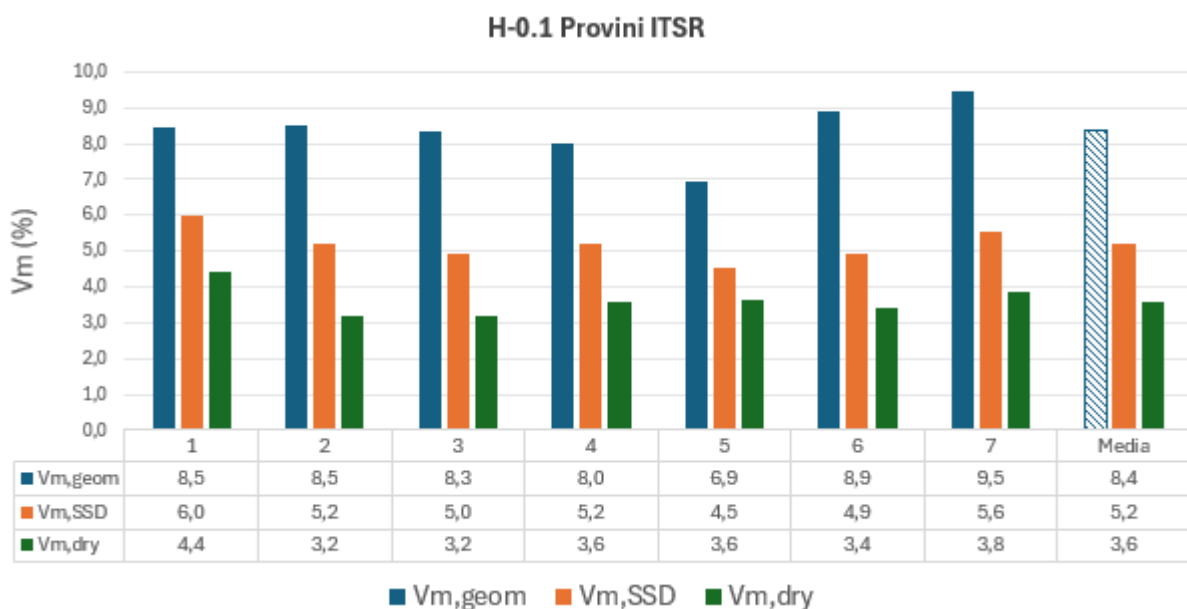


Fig. 4.16 – Vuoti miscela H-0.1 provini ITSr

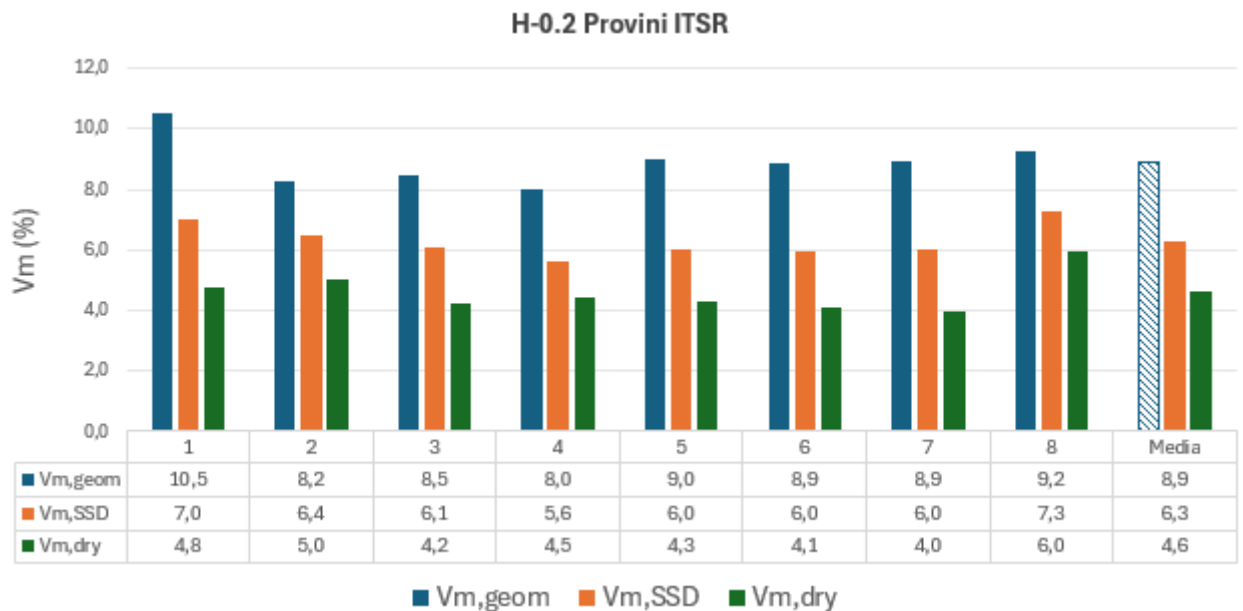


Fig. 4.17 – Vuoti miscela H-0.2 provini ITSR

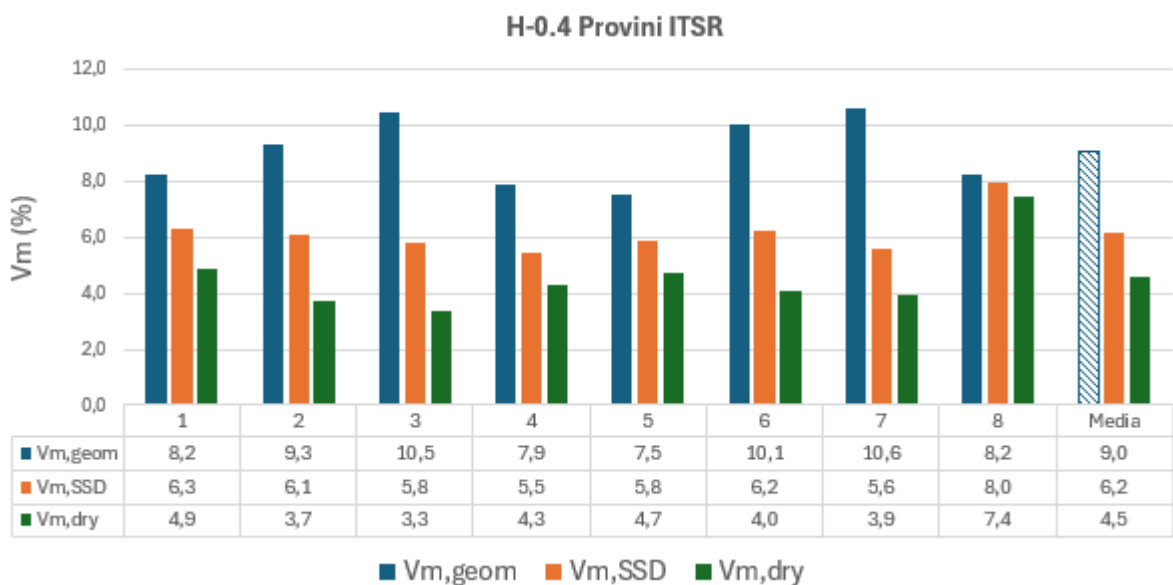


Fig. 4.18 – Vuoti miscela H-0.4 provini ITSR

Come nei casi precedenti, i valori dei vuoti ottenuti mediante il procedimento geometrico ($V_{m,geom}$), risultano visivamente maggiori, se paragonati agli altri procedimenti. Anche per i provini ITSR, ai fini di un confronto rappresentativo tra le diverse miscele contenenti percentuali differenti di materiale di recupero (PCB), si è ritenuto opportuno considerare il valore medio tra tutti i provini analizzati attraverso il procedimento geometrico. Il Capitolato tecnico Anas non fornisce limiti ben precisi riguardo tali provini, dal momento che sono realizzati a 50 giri della pressa a taglio giratoria. Osservando nel dettaglio la percentuale media

dei vuoti (Figura 4.19), si può notare come le miscele contenenti PCB (H-0.1, H-0.2, H-0.4) registrino un aumento di tale valore, se paragonate alla miscela di riferimento (H-0). Osservando il grafico presente nella Figura 4.19, emerge come l'introduzione di tale materiale innovativo influenzi le proprietà volumetriche del conglomerato, dal momento che l'andamento dei vuoti tende ad aumentare progressivamente con l'aumentare delle percentuali di materiale di recupero presente.

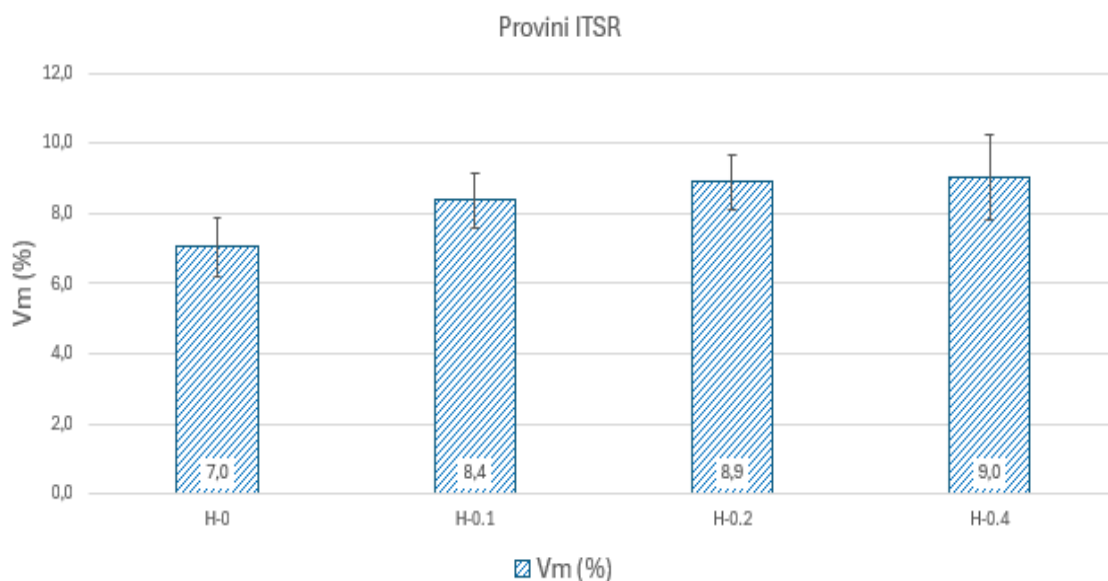


Fig. 4.19 – Confronto dei vuoti provini ITSR tra le miscele

4.1.5 – Confronto dei vuoti tra provini COMP e ITS

Ai fini di una valutazione più dettagliata del contenuto dei vuoti tra le diverse tipologie di provini prodotti, si riporta inoltre il confronto tra i provini COMP e ITS (Figura 4.20). Tale paragone è possibile dal momento che entrambi sono stati realizzati con lo stesso numero di rotazioni della pressa a taglio giratoria (180 giri). La differenza tra le due tipologie risiede nella massa di tali provini (1350 grammi per i provini COMP e 1094 grammi per quelli ITS) e ciò si traduce nella loro differente altezza finale. Dai risultati ottenuti si evince come il valore percentuale medio dei vuoti nei provini ITS, in tutte e quattro le miscele, risulti sistematicamente maggiore rispetto ai provini COMP. Quindi, la presenza di percentuali differenti di materiale di recupero (PCB) non incide su tale risultato finale. Questo si traduce in un aumento di porosità, in corrispondenza di una diminuzione della massa dei provini.

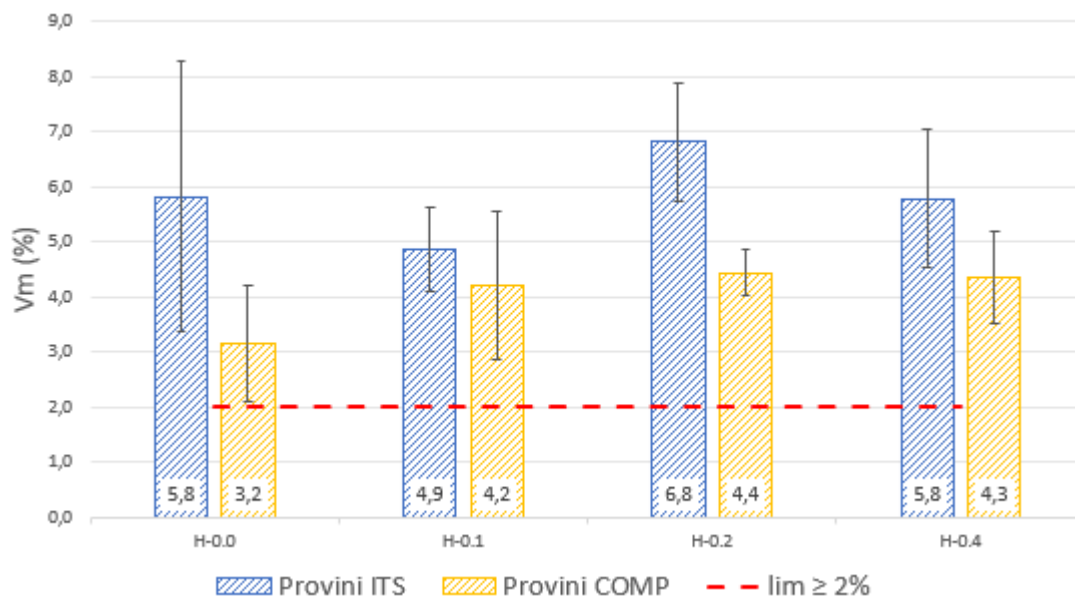


Fig. 4.20 – Confronto dei vuoti provini COMP e ITS

4.2 – Resistenza a trazione indiretta (ITS)

All'interno di questo paragrafo vengono illustrati i risultati riguardo il parametro ITS (*Indirect Tensile Strength*), di fondamentale importanza per valutare la qualità e accettabilità delle miscele. I risultati si ritengono accettabili quando risultano compresi tra 0,80 – 1,90 MPa. Tale soglia è imposta dal Capitolato Anas per lo strato di binder (Tab. 3.14), con riferimento ai requisiti da verificare su provini compattati a N₃ (180 giri della pressa a taglio giratoria), nell'ambito delle procedure tradizionali di progettazione e controllo delle miscele bituminose.

4.2.1 – Analisi ITS

Vengono illustrati di seguito i grafici relativi a ciascuna miscelazione riguardo l'indice ITS.

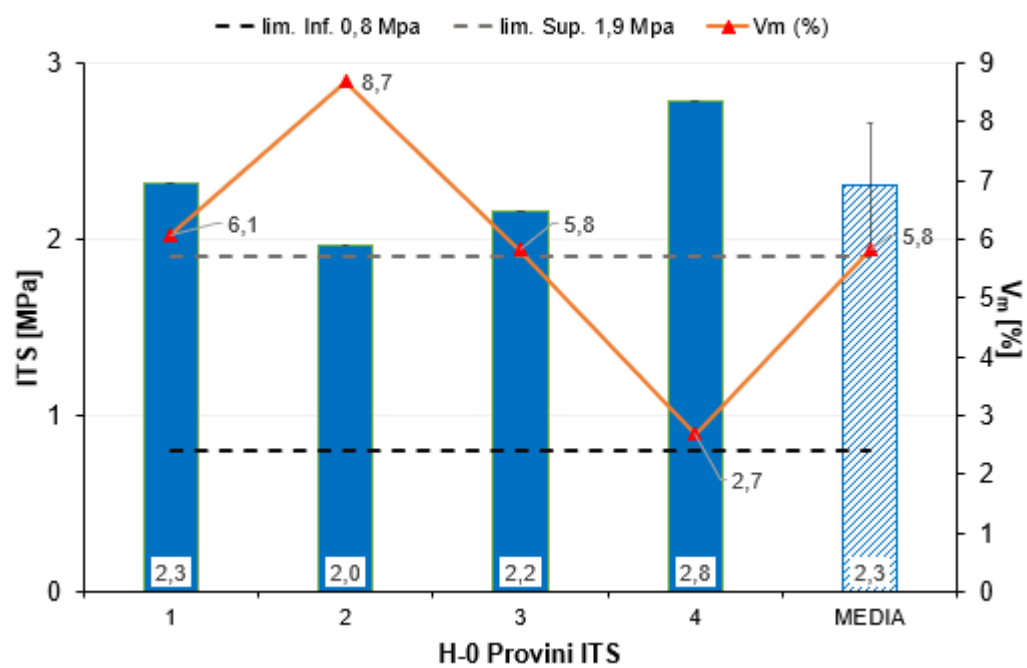


Fig. 4.21 – ITS miscela H-0

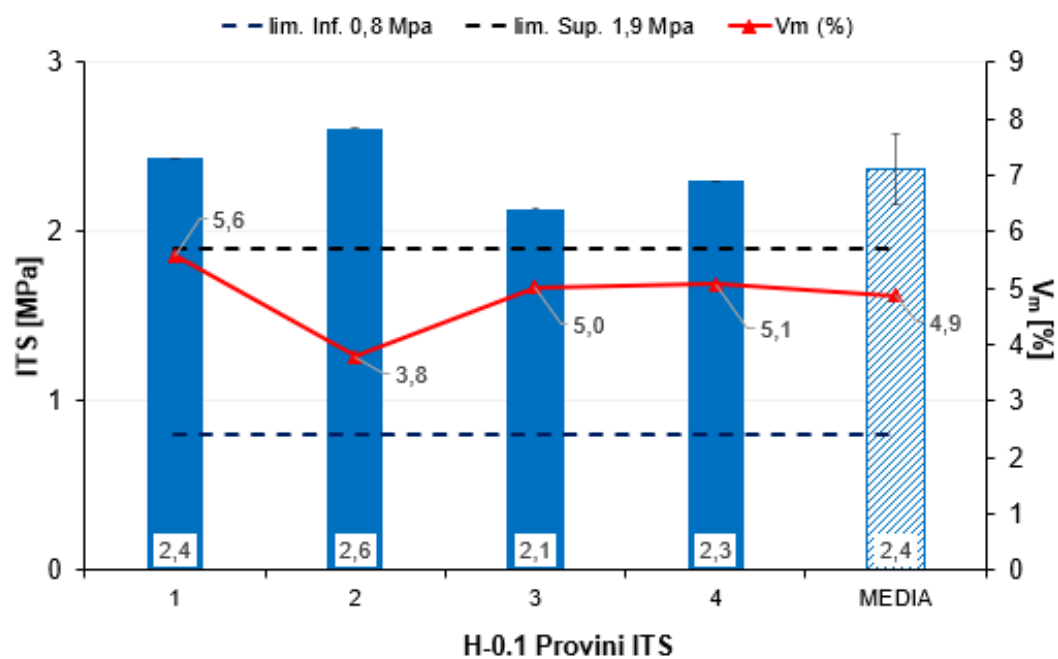


Fig. 4.22 – ITS miscela H-0.1

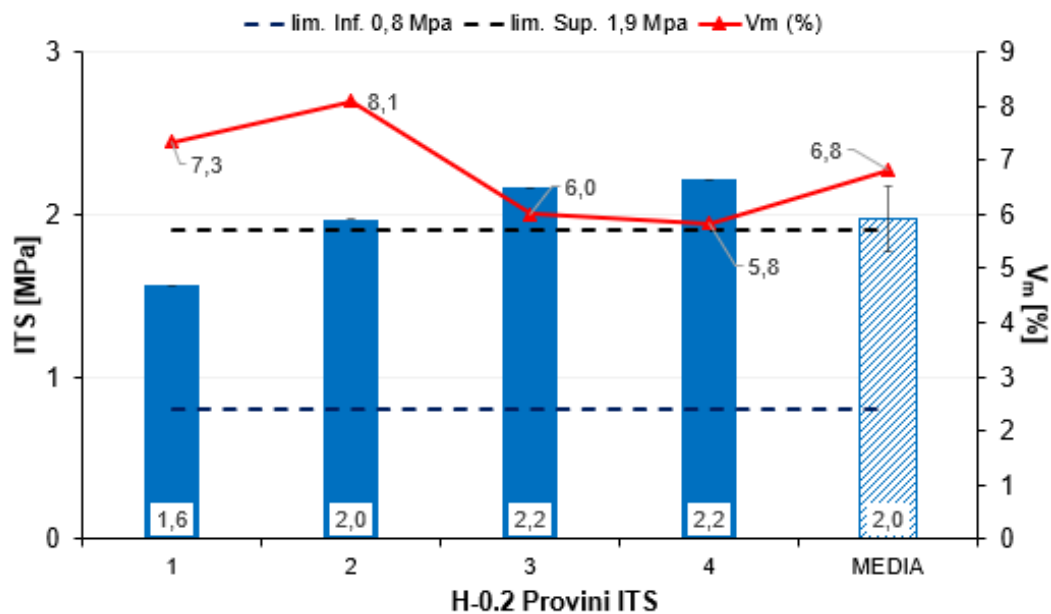


Fig. 4.23 – ITS miscela H-0.2

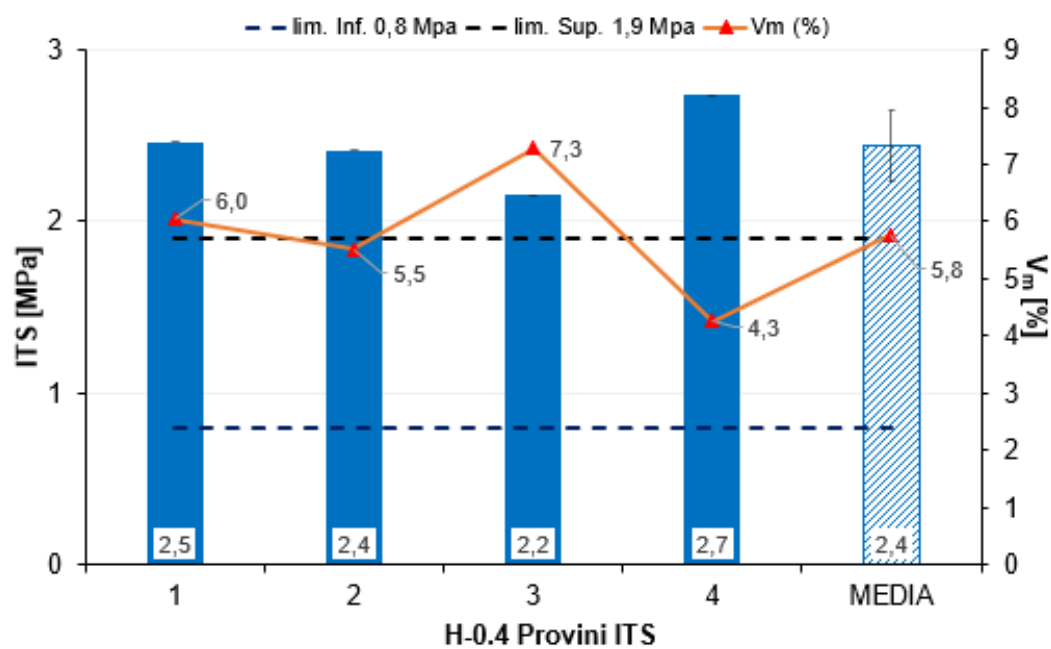


Fig. 4.24 – ITS miscela H-0.4

Da una valutazione preliminare dell'indice ITS, calcolato su ogni provino, emerge che anche per la miscela di riferimento tali valori non risultano conformi ai limiti imposti dal Capitolato tecnico Anas (linee tratteggiate illustrate nelle Figure 4.21, 4.22, 4.23, 4.24), in quanto visibilmente maggiori, tranne per la miscela H-0.2. Inoltre, ai fini di ottenere un confronto più rappresentativo tra le diverse miscele realizzate, si è ritenuto opportuno considerare i valori medi di tale parametro (Figura 4.25). Per tutti i grafici illustrati si considera anche l'andamento

del contenuto medio dei vuoti geometrici per ogni miscelazione. Come si può dedurre dalla Figura 4.25, le miscele prodotte con differente percentuale di materiale di recupero (PCB) non mostrano differenze significative nel valore dell'ITS, rispetto alla miscela di riferimento (H-0). Solo riguardo la terza miscelazione (H-0.2), si registra un lieve abbassamento dell'indice ITS. Dunque, si può affermare che l'introduzione di questo materiale innovativo all'interno delle miscele di conglomerato bituminoso non ha ripercussioni negative sui parametri di qualità e accettabilità del prodotto finale, sebbene sia importante considerare che tali valori medi dell'ITS non risultino comunque conformi ai requisiti di Capitolato.

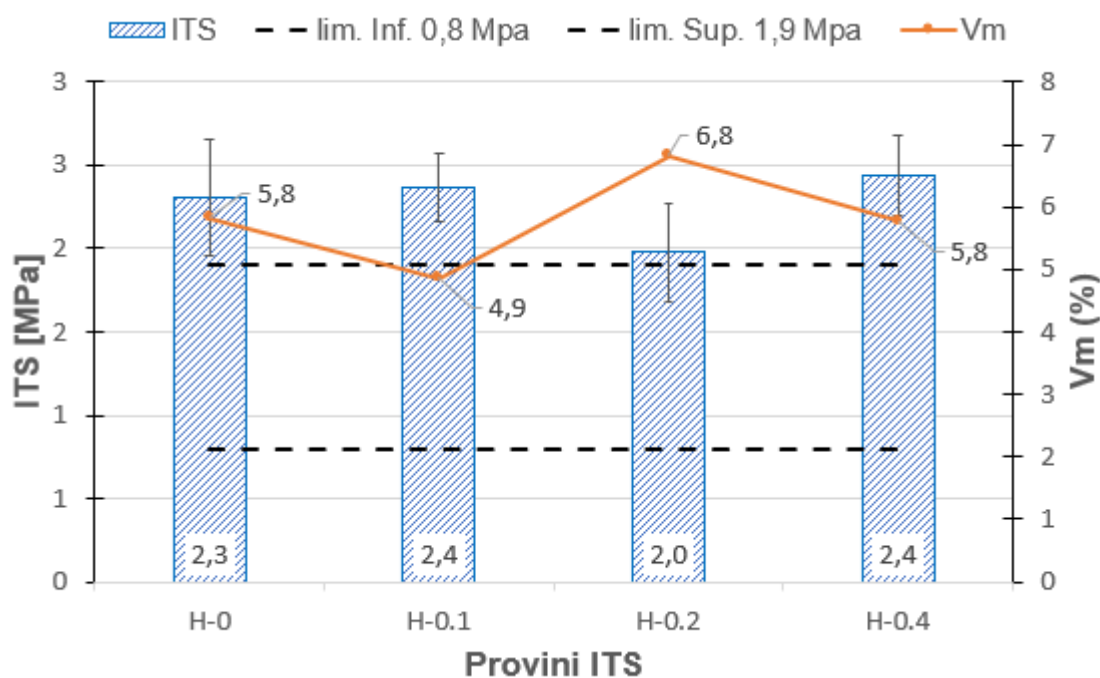


Fig. 4.25 – Confronto ITS medio tra le miscele

4.2.2 – Analisi del CTI

Riguardo i provini ITS è possibile ricavare il coefficiente di trazione indiretta (CTI), come riportato dalla formula illustrata in precedenza (§3.7.1), il quale può essere ottenuto direttamente dalla prova di trazione indiretta. Tale parametro risulta fondamentale ai fini della valutazione della rigidità delle miscele bituminose. Il Capitolato Anas fissa una soglia limite per tale parametro (Tabella 3.15), con riferimento ai requisiti da verificare su provini compattati a N₃ (180 giri della pressa a taglio giratoria), nell'ambito delle procedure tradizionali di progettazione e controllo delle miscele bituminose. Dai risultati della prova di trazione indiretta è possibile ottenere la deformazione verticale a rottura del provino (in corrispondenza del carico

massimo), il quale consente, insieme all'indice ITS determinato in precedenza, di risalire a tale parametro. Vengono riportati, nelle figure sottostanti (4.26, 4.27, 4.28, 4.29), i valori ottenuti riguardo le miscele prodotte.

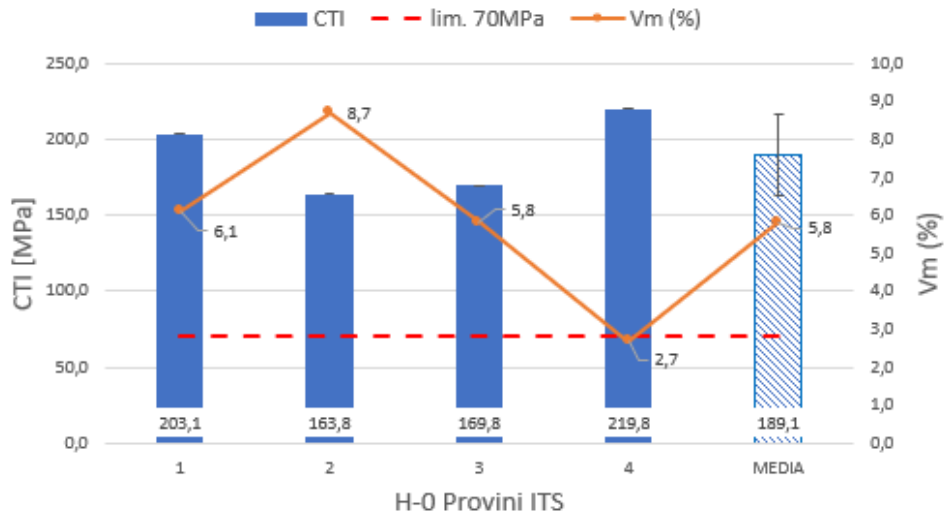


Fig. 4.26 – CTI miscela H-0

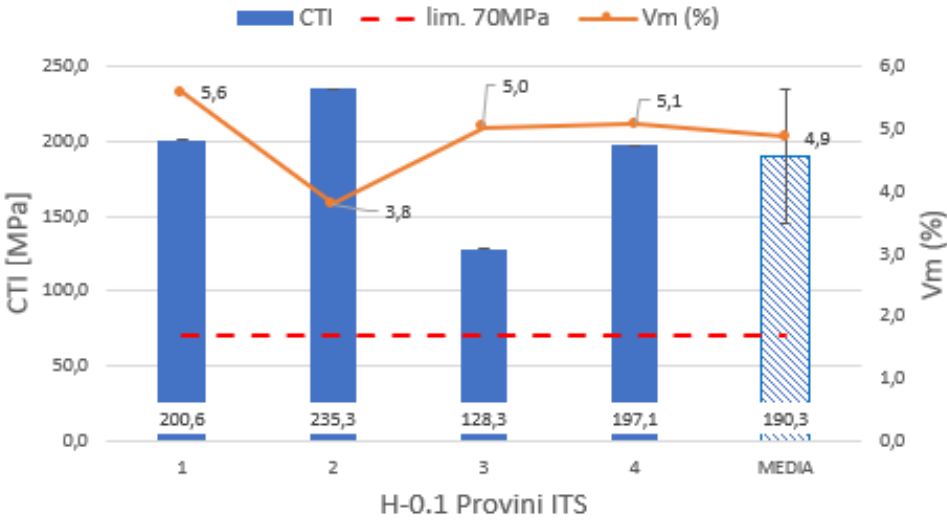


Fig. 4.27 – CTI miscela H-0.1

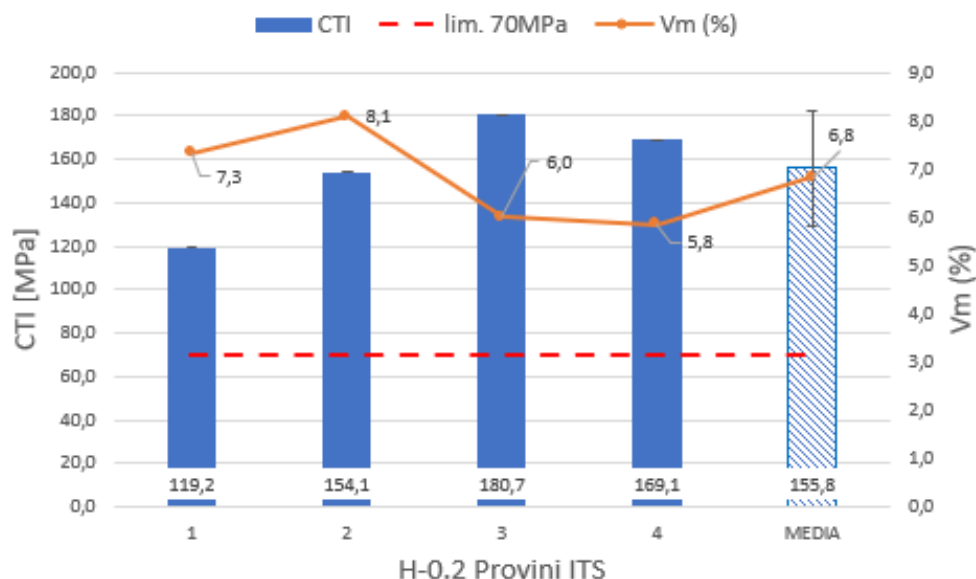


Fig. 4.28 – CTI miscela H-0.2

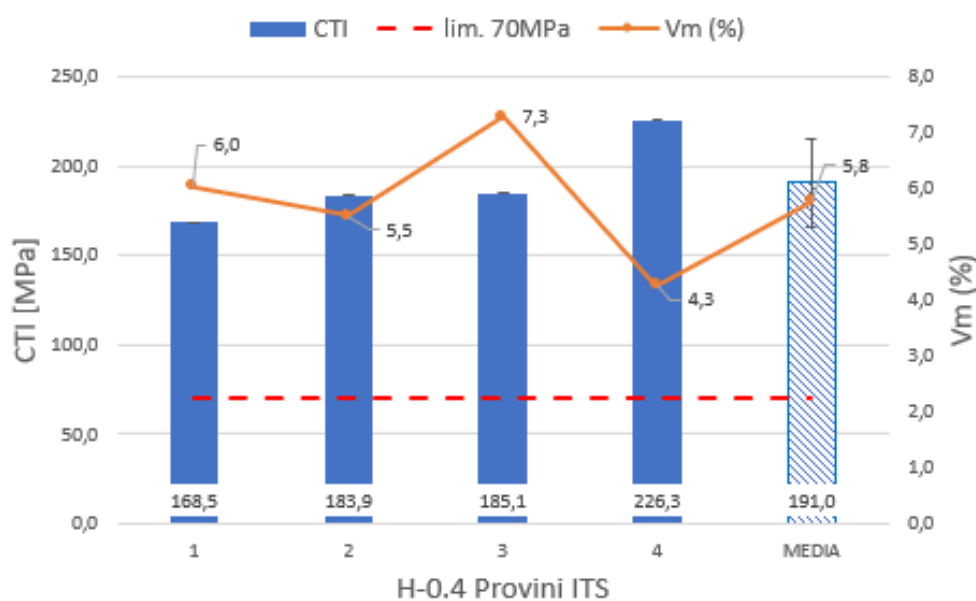


Fig. 4.29 – CTI miscela H-0.4

Alla luce di una valutazione preliminare, si evince come tale parametro risulti ampiamente conforme nei confronti del limite imposto dal Capitolato (linee rosse tratteggiate), in quanto sistematicamente maggiore. Questo esito riguardo tutte le miscele realizzate. Ai fini di ottenere un confronto più rappresentativo, tra le diverse miscele che prevedono l'impiego del materiale di recupero, si rende opportuno considerare i valori medi ottenuti, paragonandoli come fatto in precedenza con il contenuto medio dei vuoti geometrici (Figura 4.30). I risultati ottenuti non si discostano in maniera rilevante da quelli ottenuti per la miscela di riferimento.

Solo nella terza miscelazione (H-0.2) si evidenzia una sensibile riduzione del CTI, causata principalmente dalla diminuzione del quantitativo di filler presente; infatti, nell'ultima miscelazione (H-0.4), si è provveduto ad aumentare il materiale di riempimento, sostituendo parzialmente il PCB alla frazione di sabbia. Il coefficiente di trazione indiretta ritorna quindi su un valore confrontabile rispetto alla miscela di riferimento. Dai risultati ottenuti si può affermare come l'introduzione di tale materiale innovativo non influenzi negativamente la rigidità del conglomerato.

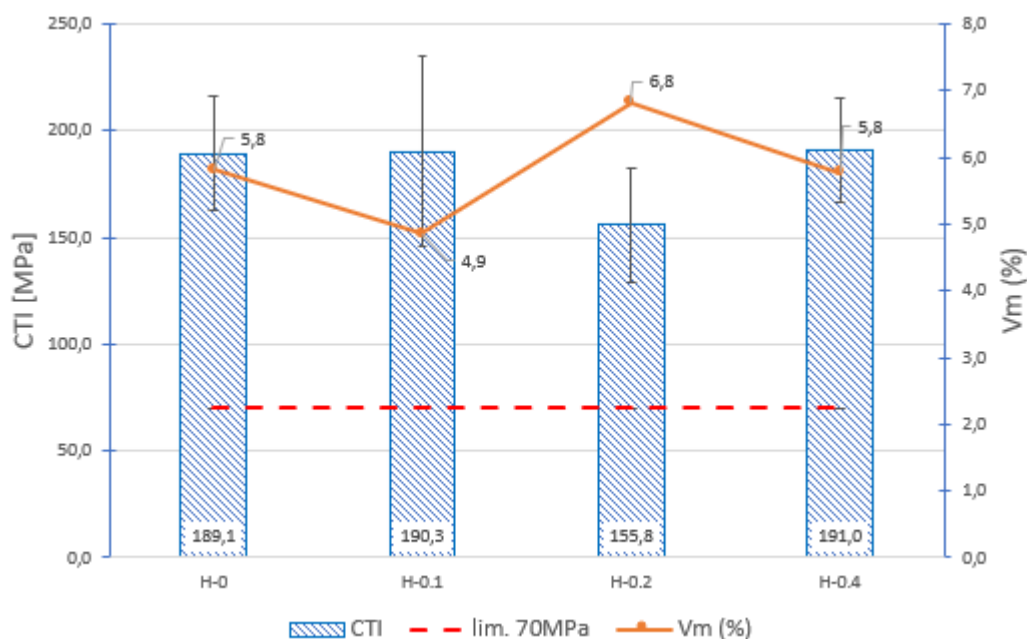


Fig. 4.30 – Confronto CTI medio tra le miscele

4.2.3 – Provini ITSR e confronto tra le miscele

Ai fini di valutare l'influenza dell'acqua sul conglomerato, i provini ITSR sono stati sottoposti a condizionamento *wet* e *dry*, ricavando quindi due valori distinti dell'indice ITS. Tali provini, infatti, sono stati sottoposti alla prova di trazione indiretta, la quale ha fornito valori differenti rispetto ai provini ITS sopra descritti, dal momento che sono stati prodotti a differenti giri della pressa. Come si può osservare dalla Figura 4.31 riportata sotto, tali valori medi dell'indice ITS risultano inferiori rispetto ai valori visibili in Figura 4.25. Inoltre, si riportano anche i valori del contenuto medio dei vuoti (sia *dry* che *wet* per ogni miscela). Nello specifico, con l'introduzione di materiale di recupero (PCB) nelle miscele, la resistenza a trazione indiretta, sia per i provini *dry* che *wet*, risulta inferiore rispetto alla miscela di riferimento (H-0). Mentre, per quanto riguarda il contenuto di vuoti, si può notare un apprezzabile aumento (sia per i

provini *dry* che *wet*), in confronto alla miscela di riferimento. Come già notato in precedenza, i vuoti tendono ad aumentare progressivamente all'aumentare delle percentuali di PCB contenute nella miscela.

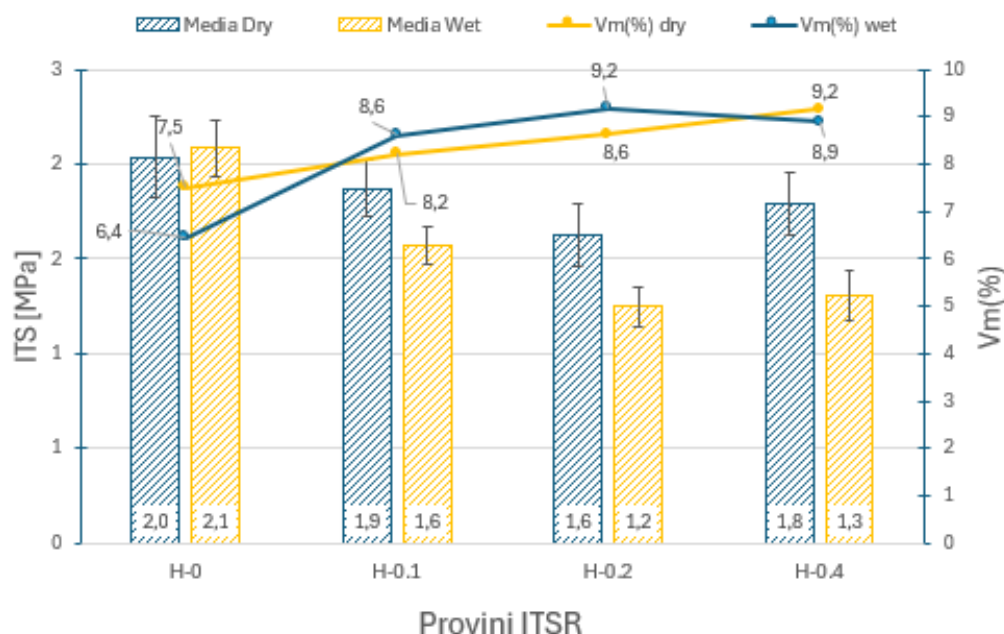


Fig. 4.31 – Confronto ITS medio dry e wet tra le miscele

4.3 – Suscettibilità all'acqua (ITSR) e confronto tra le miscele

L'indice ITSR esprime la sensibilità all'acqua di una miscela bituminosa ed è calcolato come il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta dei provini bagnati (condizionamento *wet*) e quella dei provini asciutti (condizionamento *dry*), (§3.7.2). Grazie ai valori dell'ITS riportati nella Figura 4.31, è possibile risalire a tale parametro di confronto. Nel Capitolo Anas viene specificato un limite minimo pari all'80%, riferito però solamente allo strato di usura (Tab. 3.16). Nella presente attività sperimentale si è ritenuto opportuno considerare tale limite anche per lo strato di binder (linea tratteggiata in Figura 4.37). Nella Figura 4.32, riportata di seguito, si illustra nel dettaglio l'andamento dell'indice ITSR nelle diverse miscele realizzate e si può osservare come tale limite risulti soddisfatto solamente nella miscela H-0.1, sempre confrontato con l'andamento medio dei vuoti geometrici. In particolare, si può notare come, all'aumentare delle percentuali d'impiego del materiale di recupero (PCB) all'interno della miscela, il parametro ITSR si abbassi notevolmente, se paragonato alla miscela di riferimento (H-0). Tale esito sottolinea un'influenza negativa di tale materiale innovativo all'interno della miscela, il quale tende a diventare più suscettibile all'azione dell'acqua.

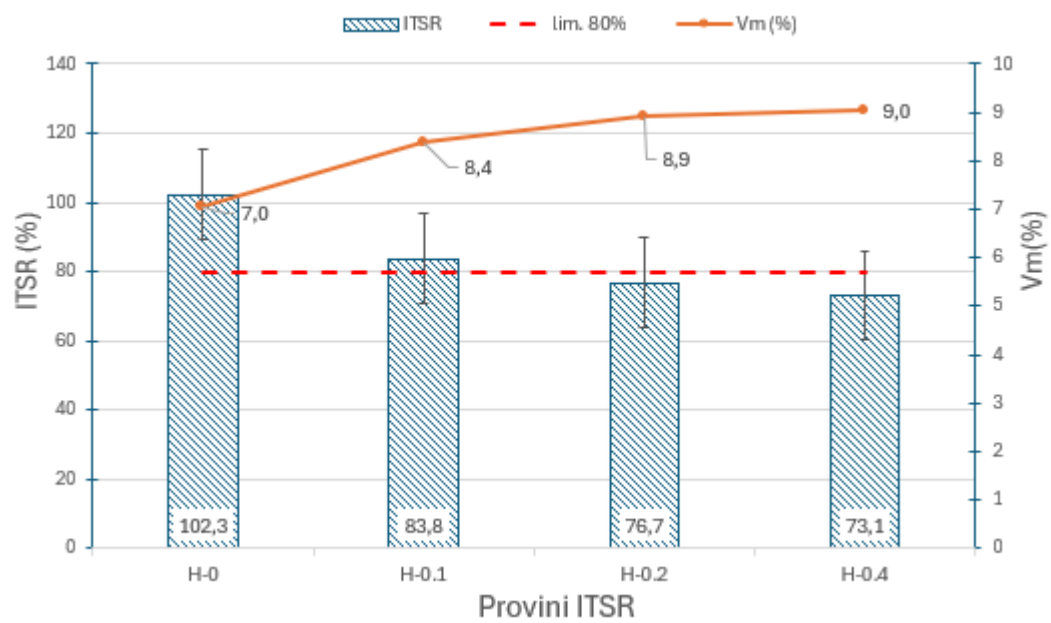


Fig. 4.32 – Confronto ITSR tra le miscele

CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI

L'attività sperimentale condotta permette di valutare la compattabilità e le prestazioni meccaniche dei provini di conglomerato bituminoso per strati di binder, prodotti attraverso l'inserimento di materiale di recupero proveniente dai circuiti stampati (PCB). Dai risultati illustrati nel Capitolo 4, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Lo studio della compattabilità, in termini di CEI e contenuto di vuoti residui, fornisce indicazioni significative riguardo l'impiego del materiale di recupero (PCB) all'interno delle miscele bituminose, per valutarne la capacità di addensamento. Dall'analisi del contenuto medio dei vuoti valutati a 10, 100 e 180 giri della pressa giratoria è emerso che le miscele contenenti materiale di recupero (PCB) risultano sistematicamente caratterizzate da maggiore porosità, in confronto alla miscela di riferimento. L'analisi dei risultati relativi all'indice di compattabilità CEI evidenzia che le miscele contenenti materiale di recupero presentano, nel complesso, una capacità di addensamento paragonabile a quella della miscela di riferimento. Solo la miscela con il 2% di materiale di recupero mostra un valore leggermente più elevato del CEI, indicando la necessità di un maggiore sforzo per raggiungere il medesimo livello di compattazione.
- La prova di trazione indiretta permette di ottenere parametri rappresentativi, come la resistenza a trazione indiretta (ITS) e il coefficiente di trazione indiretta (CTI), che consentono di valutare le prestazioni meccaniche e vengono utilizzati come criterio di accettazione delle miscele nell'ambito delle norme tecniche di Capitolato. Analogamente a quanto ottenuto per lo studio di compattabilità, le miscele prodotte con differente percentuale di materiale di recupero (PCB) non mostrano differenze significative nel valore della resistenza ITS e del coefficiente CTI, rispetto alla miscela di riferimento (H-0). Solamente nella miscela con il 2% di materiale di recupero (H-0.2), si è osservato un abbassamento dei valori di tali parametri, che può essere in parte dovuto a un contenuto medio dei vuoti più elevato rispetto alle altre miscele. Dunque, si può affermare che l'introduzione di questo materiale innovativo all'interno delle miscele di conglomerato bituminoso non ha ripercussioni negative, in termini di resistenza ITS e rigidità CTI, sui parametri di qualità e accettabilità del prodotto finale.
- Al fine di valutare la suscettibilità all'acqua delle miscele bituminose si è ritenuto opportuno calcolare l'indice ITSR che caratterizza le prestazioni delle miscele in presenza di acqua. Osservando i risultati ottenuti, emerge una progressiva riduzione del valore di ITSR nelle diverse miscele contenenti PCB rispetto alla miscela di riferimento. All'aumentare della percentuale di sostituzione si osserva una riduzione del valore medio di ITSR, sintomatico

di un progressivo aumento della suscettività all'acqua delle miscele confezionate con una maggiore percentuale di materiale di recupero.

Concludendo, l'impiego di materiali di recupero proveniente da circuiti stampati all'interno delle miscele per conglomerati bituminosi presenta significativi vantaggi di natura sia economica che ambientale, garantendo al contempo prestazioni accettabili ed in linea con la miscela di riferimento e con i limiti imposti dai Capitolati. Dal punto di vista della sostenibilità, l'utilizzo di tali materiali secondari consente una riduzione del consumo di aggregati naturali vergini, con un conseguente contenimento dei costi delle materie prime. Allo stesso tempo, tale pratica risponde alle necessità di salvaguardia ambientale e offre una soluzione efficace al problema del loro smaltimento. Tuttavia, si riscontrano limitazioni di carattere tecnico e logistico. Tra i principali svantaggi, vi è quello legato alla difficile reperibilità di grandi quantità di tale materiale, idoneo alla miscelazione. A ciò si aggiungono le possibili complicazioni tecnico-operative in fase di industrializzazione. Infatti, l'integrazione di tali componenti nel conglomerato bituminoso richiede specifici trattamenti preliminari di disassemblaggio e frammentazione meccanica, finalizzati a prelevare le frazioni non metalliche necessarie all'impiego. Nonostante le difficoltà appena discusse, i circuiti stampati (PCB) giunti a fine vita risultano essere un'interessante risorsa secondaria, in un'ottica di economia circolare. Da ciò deriva la crescente curiosità della comunità scientifica e del settore verso lo sviluppo di processi innovativi, finalizzati a ridurre gli impatti ambientali e a contenere l'esaurimento delle risorse naturali non rinnovabili. Sebbene i risultati ottenuti forniscano indicazioni significative, la sperimentazione condotta non consente di trarre conclusioni definitive. Si rendono quindi necessari ulteriori studi sperimentali e analitici per caratterizzare in modo più approfondito il comportamento meccanico di questo materiale, la cui diffusione sul mercato è relativamente recente.

RIFERIMENTI

- [1] SITEB. (2026, May 5). *Rassegna del Bitume 112/26 - SITEB*.
- [2] ANAS S.P.A. *Le pavimentazioni stradali. Prontuario per la progettazione, esecuzione e collaudo dei lavori sul piano viabile*. Roma: ANAS S.p.A., 2019. I Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture, Vol. V, Quaderno Tecnico n. 17.
- [3] *Definiti i Criteri ambientali minimi per strade e contratti a prestazione energetica - Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica*. (n.d.). Ministero Dell'Ambiente E Della Sicurezza Energetica.<https://www.mase.gov.it/portale/-/definiti-i-criteri-ambientali-minimi-per-strade-e-contratti-a-prestazione-energetica> [Ultimo aggiornamento 9 settembre 2024; ultima consultazione 1 giugno 2026].
- [4] *Rifiuti elettronici nell'UE: dati e cifre (infografica) | Tematiche | Parlamento europeo*. (n.d.).<https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20201208STO93325/rifiuti-elettronici-nell-ue-dati-e-cifre-infografica>.
- [5] ANAS S.p.a. (s.d.). *Uso responsabile delle risorse naturali*. Strade Anas. <https://www.stradeanas.it/it/uso-responsabile-delle-risorse-naturali> [ultima consultazione: 8 giugno 2026].
- [6] Peterson, Z. (2026, June 20). *Cos'è un PCB? Significato e funzionamento di una scheda PCB*. Altium. <https://resources.altium.com/it/p/what-is-a-pcb> [ultima consultazione: 11 giugno 2026].
- [7] Ecosapiens. (2025, June 23). *RAEE: cosa cambia con la nuova normativa 2025–2027*. S.A.Ba.R.<https://www.sabar.it/2025/raee-cosa-cambia-con-la-nuova-normativa-2025-2027/> [ultimo aggiornamento: 19 giugno 2025 pubblicato in S.A.Ba.R. (n.d.). *Approfondimenti Archives*. S.A.Ba.R. <https://www.sabar.it/categoria/approfondimenti/>].
- [8] Zhao, X., Wang, X. Q., Chow, C. L., & Lau, D. (2026). *Sustainable civil engineering with recycled non-metallic fractions of waste printed circuit boards*. Journal of Building Engineering, 117, Articolo 114811.
- [9] Hty. (n.d.). *Riciclo dei circuiti stampati: come riciclare una scheda PCB*.<https://pcbasic.com/it/blog/circuit-board-recycling.html> [ultima consultazione: 13 giugno 2026].
- [10] Becci, A., Amato, A., Fonti, V., Karaj, D., & Beolchini, F. (2020). *An innovative biotechnology for metal recovery from printed circuit boards*. Resources, Conservation and Recycling, 153, Articolo 104550.

- [11] Meng, Y., Liao, Y., Liu, Z., Chen, J., Yang, X., & Rong, H. (2021). *Study on rheological properties of bituminous binders and mixtures containing waste printed circuit boards (PCBs) and SBR compound modified bitumen*. Materials, 14(7), Articolo 1697.
- [12] Li, S., Sun, Y., Fang, S., Huang, Y., Yu, H., & Ye, J. (2022). *Recycling non-metallic powder of waste printed circuit boards to improve the performance of asphalt material*. Materials, 15(12), Articolo 4172.
- [13] Shafiee, Mohammad & Fattahi, Morvarid. (2024). *Performance Evaluation of an Asphalt Mix Containing Non-Metallic Fractions of Recycled Printed Circuit Boards*. Journal of Civil Engineering and Construction. 13. 59-66.
- [14] Ranadive, Mahadeo Sambhaji & Shinde, Maheshkumar. (2012). *Performance evaluation of e-waste in flexible pavement – an experimental approach*. International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD). 2. 1-11.
- [15] Santagata, Ezio & Bassani, Marco. (2004). *Assessing the effects of refuse derived plastics used as additives in bituminous mixtures*.
- [16] UNI EN 13108-8, 2016 “Miscele bituminose – Specifiche del materiale – Parte 8: Conglomerato bituminoso di recupero”.
- [17] Santagata, F. A. (2016). *Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali*. Vol. 1 – progettazione: 472-492, 492-522, 537-585. Vol. 2 – costruzione, gestione e manutenzione: 193-207.
- [18] UNI EN 13043, 2004 “Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico”.
- [19] UNI EN 1097-7, 2008 “Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Parte 7: Determinazione della massa volumica del filler – Metodo con picnometro”.
- [20] UNI EN 933-1, 2012 “Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura”.
- [21] UNI EN 12697-31, 2019 “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 31: Preparazione del provino con pressa giratoria”.
- [22] UNI EN 12697-5, 2008 “Miscele bituminose – Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 5: Determinazione della massa volumica massima”.
- [23] UNI EN 12697-8, 2019 “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 8: Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi”.

- [24] UNI EN 12697-6, 2012 “Miscele bituminose – Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 6: Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi”.
- [25] UNI EN 12697-12, 2018 “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 12: Determinazione della sensibilità all’acqua dei provini bituminosi”.
- [26] UNI EN 12697-23, 2018 “Miscele bituminose – Metodi di prova – Parte 23: Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi”.