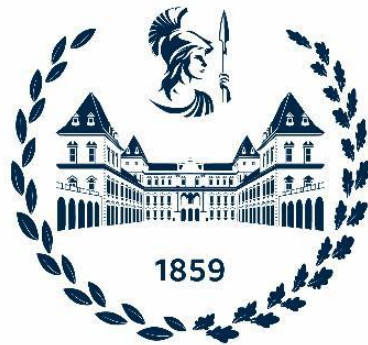




**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Gestione e riqualificazioni delle costruzioni e delle infrastrutture

Anno Accademico 2025/2026

Miscele bituminose sostenibili: analisi sperimentale e mix design

Relatori:

Prof. Orazio Baglieri

Prof. Davide Dalmazzo

Davide Cimenti

Candidato:

Michele Crobu

Abstract

Il presente lavoro di tesi, inserito nel progetto Green Roads, indaga lo sviluppo di conglomerati bituminosi sostenibili per strati di collegamento (binder). La ricerca approfondisce l'integrazione di plastiche riciclate post-consumo mediante tecnologia dry, operando in conformità ai Criteri Ambientali Minimi (CAM) per quanto concerne la riduzione delle temperature di produzione e l'impiego di elevate percentuali di fresato d'asfalto (RAP).

La campagna sperimentale è stata finalizzata all'individuazione del contenuto ottimo di bitume attraverso l'analisi meccanica e volumetrica di miscele caratterizzate da differenti fusi granulometrici, percentuali di polimero e tenori di legante aggiunto. L'obiettivo è duplice: selezionare lo scheletro litico più idoneo e valutare il ruolo della plastica come parziale sostituto del legante vergine.

I risultati evidenziano come il polimero influenzi le prestazioni della miscela operando prevalentemente come aggregato piuttosto che come fase legante attiva. Tale evidenza valida l'ipotesi che l'impiego di plastiche riciclate permetta una riduzione del bitume vergine a parità di prestazioni meccaniche. La soluzione si prospetta dunque promettente sia sotto il profilo ambientale che economico favorendo il recupero di materiali post-consumo e riducendo l'implemento di risorse vergini.

– ENGLISH VERSION –

This thesis, conducted within the Green Roads project, investigates the development of sustainable asphalt mixtures for binder courses. The research focuses on the integration of post-consumer recycled plastics using the dry technology, in compliance with the Minimum Environmental Criteria (CAM) regarding the reduction of production temperatures and the use of high percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).

The experimental campaign aimed to identify the optimum binder content through mechanical and volumetric analyses of mixtures characterized by different aggregate gradations, polymer percentages, and added binder contents. The objective is twofold: to select the most suitable aggregate skeleton and to evaluate the role of plastic as a partial substitute for virgin bitumen.

The results highlight that the polymer influences the mixture performance by acting predominantly as an aggregate rather than an active binder phase. This evidence validates the hypothesis that the use of recycled plastics allows for a reduction in virgin bitumen content while maintaining equivalent mechanical performance. Consequently, this solution appears promising from both environmental and economic perspectives: it promotes the recovery of post-consumer materials and reduces the consumption of virgin resources.

Sommario

Abstract.....	2
Introduzione	9
Impostazione della ricerca	11
Progetto Green Roads.....	12
Struttura del lavoro	12
1 Miscele bituminose sostenibili	14
1.1 Metodo <i>wet</i>	14
1.2 Metodo <i>dry</i>	15
1.3 Mix design.....	18
1.3.1 SUPERPAVE mix design	19
1.3.2 Marshall mix design	22
2 Programma sperimentale	24
2.1 Obiettivi	24
2.2 Rispetto dei requisiti (CAM e capitolato)	27
3 Materiali e metodi	30
3.1 Materiali.....	30
3.1.1 Aggregati e RAP.....	30
3.1.2 Plastiche da recupero.....	35
3.1.3 Bitume.....	38
3.1.4 Rejuvenator.....	39
3.2 Produzione delle miscele e confezionamento dei campioni di prova.....	39
3.2.1 Determinazione della curva granulometrica	41
3.2.2 Fase di produzione della miscela.....	42
3.2.3 Determinazione della massima massa volumica teorica	48
3.2.4 Determinazione della densità apparente e del volume dei vuoti.....	50

3.2.5	Determinazione della percentuale di bitume tramite prova di ignizione	51
3.2.6	Determinazione della curva granulometrica di estrazione	53
3.2.7	Determinazione del modulo di rigidezza.....	55
3.2.8	Determinazione della resistenza a trazione indiretta.....	58
4	Analisi dei risultati	60
4.1	Confronto delle granulometrie	60
4.2	Analisi volumetrica	65
4.2.1	Percentuale dei vuoti.....	66
4.2.2	VMA e VFB	70
4.3	Analisi delle prestazioni meccaniche	76
4.3.1	Modulo di rigidezza	76
4.3.2	Resistenza a trazione indiretta.....	77
4.4	Miscele di progetto.....	79
5	Conclusioni.....	81
6	Bibliografia	83
7	Allegati	86

Indice delle figure

Figura 0.1 Schematizzazione dei processi di produzione lineare e circolare	10
Figura 1.1 Metodologie di introduzione dei polimeri all'interno delle miscele bituminose	14
Figura 1.2 Esempio di metodo dry modificato	16
Figura 1.3 Struttura generale del metodo SUPERPAVE	19
Figura 1.4 Variazione dei parametri volumetrici al variare della percentuale di legante	21
Figura 1.5 Processo di progettazione volumetrica	22
Figura 3.1 Deaerazione degli aggregati	31
Figura 3.2 Colonna di setacci utilizzata nella prova di setacciatura	34
Figura 3.3 Deaerazione e quartatura delle plastiche MEG	38
Figura 3.4 Schema di compattazione	44
Figura 3.5 Fustella e inserti metallici circolari	45
Figura 3.6 Pressa a taglio giratoria.....	45
Figura 3.7 Punti di misura delle altezze.....	46
Figura 3.8 Misurazione delle altezze.....	46
Figura 3.9 Provini compattati	47
Figura 3.10 Misurazione della MMVT	49
Figura 3.11 Immersione in acqua dei provini per determinazione della densità apparente.....	51
Figura 3.12 Cestello per prova di ignizione con materiale all'interno	52
Figura 3.13 Colonna di setacci	55
Figura 3.14 UTM – Universal Testing Machine.....	56
Figura 3.15 Configurazione del castelletto per la misura della rigidità	57
Figura 3.16 Configurazione di carico per la misura del modulo di rigidità	58

Indice dei grafici

Grafico 2.1 Limiti ANAS fuso granulometrico (collegamento).....	28
Grafico 3.1 Curve delle varie frazioni granulometriche	35
Grafico 3.2 Rappresentazione della distribuzione granulometrica delle plastiche MEG.....	36
Grafico 3.3 Curva di compattazione semi-logaritmica.....	47
Grafico 3.4 Andamento del carico a rottura	59
Grafico 4.1 Sovrapposizione delle curve teoriche e delle curve di estrazione medie.....	61
Grafico 4.2 Curve di estrazione delle miscele prodotte.....	61
Grafico 4.3 Curve granulometriche medie delle miscele prodotte	62
Grafico 4.4 Valori medi dei vuoti a 100 rotazioni per i tre scheletri litici	63
Grafico 4.5 Andamento della percentuale dei vuoti rispetto a % BA.A per le miscele compattate a 10 rotazioni	67
Grafico 4.6 Andamento della percentuale dei vuoti rispetto a %BA.A per le miscele compattate a 100 rotazioni	68
Grafico 4.7 Andamento della percentuale dei vuoti rispetto al % BA.A per le miscele compattate a 180 rotazioni	69
Grafico 4.8 Carta di controllo MMVT.....	70
Grafico 4.9 Carta di controllo della fase legante	72
Grafico 4.10 Valori medi della VMA calcolata sulla base del dato sperimentale di % B.M (istogramma)	73
Grafico 4.11 Andamento della VMA calcolata sulla base del dato sperimentale di % B.M (grafico a dispersione)	73
Grafico 4.12 Valori medi di VFB calcolati sulla base del dato sperimentale di %B.M (istogramma)	75
Grafico 4.13 Andamento della VFB calcolata sulla base del dato sperimentale di % B.M (grafico a dispersione)	75
Grafico 4.14 Rappresentazione del modulo di rigidezza al variare del %BA.A e della %WP.M.....	77

Grafico 4.15 Rappresentazione del ITS al variare del %BA.A e delle %WPM	78
Grafico 4.16 Percentuali dei vuoti a 100 rotazioni con l'indicazione dei riferimenti da Capitolato ANAS.....	79

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Matrice degli esperimenti adottata.....	25
Tabella 2.3 Limiti ANAS fuso granulometrico (collegamento).....	28
Tabella 2.3 Parametri di prova per la produzione dei campioni.....	29
Tabella 2.4 Requisiti di accettazione - caratteristiche volumetriche	29
Tabella 2.5 Requisiti di accettazione – caratteristiche meccaniche	29
Tabella 3.1 Campioni di prova per la determinazione della massa volumica	31
Tabella 3.2 Densità delle varie frazioni granulometriche	32
Tabella 3.3 Campioni di prova per la determinazione della distribuzione granulometrica	33
Tabella 3.4 Distribuzioni delle varie frazioni granulometriche.....	34
Tabella 3.5 Distribuzione granulometrica delle plastiche MEG	36
Tabella 3.6 Percentuali di plastica residua in funzione della massa del campione	37
Tabella 3.7 Massa volumica della plastica MEGPO.....	38
Tabella 3.8 Proprietà del bitume 70/100	39
Tabella 3.9 Tabella riassuntiva delle miscele realizzate.....	41
Tabella 3.10 Percentuali delle frazioni granulometriche per i diversi scheletri litici.....	41
Tabella 3.11 Temperature di preriscaldamento.....	43
Tabella 3.12 Apertura dei setacci	55
Tabella 4.1 Passanti medi per ogni curva granulometrica.....	62
Tabella 4.2 Valutazione degli errori tra la curva 1 e la curva 2	64
Tabella 4.3 Valutazione degli errori tra la curva 1 e la curva 3	64
Tabella 4.4 Valutazione degli errori tra la curva 2 e la curva 3	64

Introduzione

La produzione e impiego dei polimeri sono aumentati in maniera considerevole negli ultimi anni, comportando una serie di problematiche di natura igienico ambientale. Si stima che nel 2025 circa 72 milioni di tonnellate di plastica sono state disperse in ambiente e non correttamente smaltite. Allo stesso modo, è allarmante che l'80% della popolazione mondiale risieda attualmente in Paesi che hanno superato la propria capacità di gestire i rifiuti di plastica in loco. Tale squilibrio è confermato dall'analisi di OCSE la quale sottolinea come gli attuali tassi di riciclo efficace arrivino al 9%. Anche la Cina, nonostante sia leader mondiale in questo settore, con un tasso di riciclaggio di circa il 30% (circa 19 milioni di tonnellate riciclate nel 2021), conta un 70% dei rifiuti di plastica che viene ancora incenerito o smaltito in discarica (Zhao et. al., 2026).

La gestione dei rifiuti polimerici rappresenta quindi una delle sfide tecnologiche e normative più urgenti per la salvaguardia degli equilibri biologici e della salute pubblica, a causa della persistenza di modelli di consumo *prevalentemente lineari* e della complessa eterogeneità chimica dei flussi di scarto. I modelli di consumo lineari, infatti, costituiscono dei flussi di produzione unidirezionali che, come rappresentato in Figura 0.1 si originano con la fase di estrazione delle materie prime vergini, principalmente risorse fossili, che vengono trasformate attraverso processi industriali in prodotti plastici pronti all'uso. Seguono la fase di consumo, caratterizzata da un ciclo di vita del prodotto spesso estremamente breve, per confluire infine direttamente nel “fine vita”, punto più critico del processo (Vollmer et. al., 2020). Questo concetto segna una rottura definitiva nel ciclo della materia; infatti, una volta che l'oggetto ha esaurito la sua funzione d'uso o il suo valore economico viene espulso dal sistema produttivo.

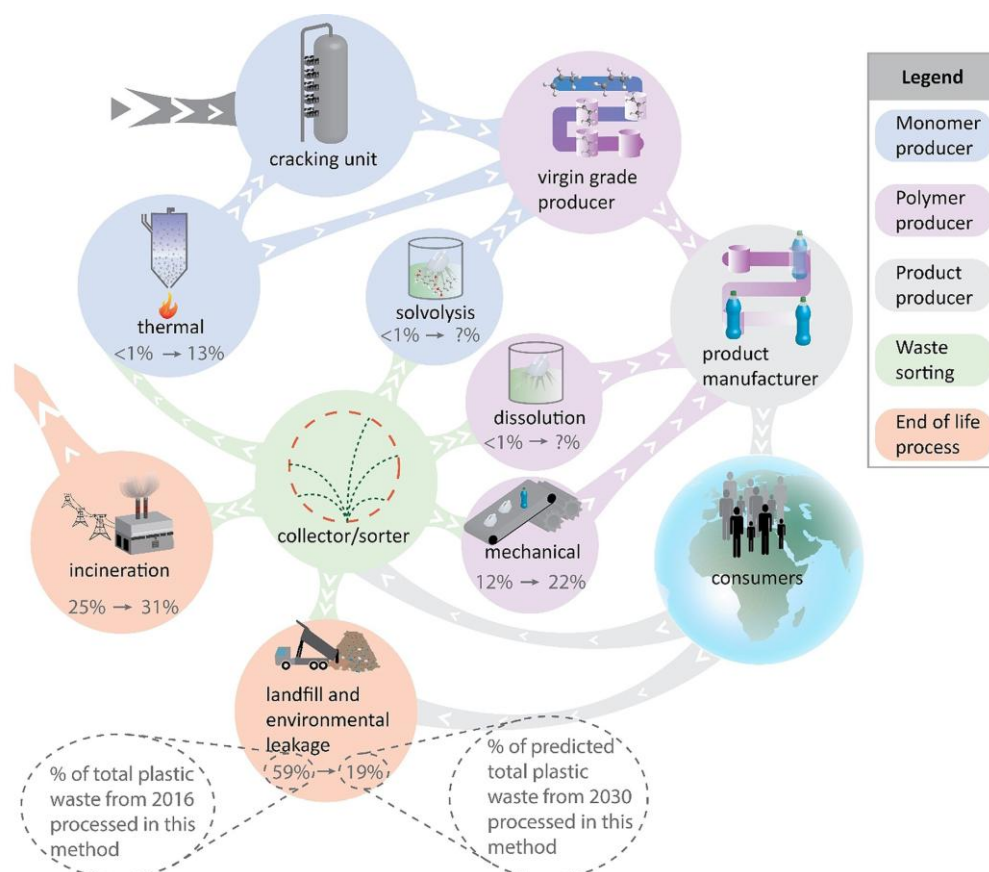


Figura 0.1 Schematizzazione dei processi di produzione lineare e circolare

Questa impostazione genera inevitabilmente delle criticità ambientali profonde e sistemiche poiché trasforma materiali potenzialmente preziosi in agenti inquinanti. In tal senso, anche i processi di smaltimento non vengono in aiuto: il ricorso sistematico alla discarica non risolve il problema della materia, ma lo sposta nel tempo e nello spazio, causando degradazione dei suoli e la contaminazione delle falde. Anche l'incenerimento, pur essendo presentato come una forma di recupero energetico, riflette la medesima criticità: distruggendo la struttura molecolare dei polimeri, immette nell'atmosfera ingenti quantità di anidride carbonica e sostanze tossiche, rendendo impossibile il recupero della materia vergine. Queste problematiche aprono la strada alla necessità di trovare un modello di economia circolare in modo tale da reinserire i polimeri nel circolo produttivo.

In questo scenario, la necessità di trovare nuovi sbocchi per il recupero delle plastiche post-consumo ha trovato un terreno fertile nel settore delle costruzioni stradali, dove l'enfasi globale sulla sostenibilità e sulla riduzione dell'impronta di carbonio sta guidando una profonda trasformazione delle pavimentazioni per il loro intero ciclo di vita. L'obiettivo è la transizione verso infrastrutture concepite come *strumenti attivi*, capaci di integrare sottoprodotti riciclati o materiali

di scarto in piena conformità con il quadro normativo italiano più recente, rappresentato dai "Criteri Ambientali Minimi" (CAM Strade). Tale decreto, oltre a imporre limitazioni termiche per i processi di miscelazione e compattazione, stabilisce requisiti stringenti circa l'impiego di fresato d'asfalto, incentivando indirettamente la ricerca di soluzioni innovative per incrementare i tassi di recupero complessivi. In tale ottica, l'incorporazione degli scarti plastici all'interno delle miscele bituminose emerge come una promettente opportunità di valorizzazione: la comune matrice idrocarburica che lega i polimeri al bitume — quest'ultimo derivato dalla raffinazione del petrolio — garantisce infatti un'adeguata affinità chimica tra le fasi. Tale compatibilità rende i rifiuti polimerici candidati ideali per la modifica e la caratterizzazione prestazionale dei conglomerati bituminosi, offrendo una risposta concreta alla necessità di una simbiosi efficace e riproducibile su scala industriale, tra il comparto dei rifiuti e quello del mondo delle pavimentazioni stradali.

Inoltre, anche l'aggiunta di scarti plastici poveri contenuti risultano essere comunque benefici ai fini di un ciclo produttivo circolare (Beghetto et. al., 2021), dal momento che la loro introduzione può migliorare alcune caratteristiche del conglomerato, trasformando quindi un costo di smaltimento in una risorsa tecnica.

Infatti, le miscele contenenti WOPO presentano valori di rigidità superiori rispetto ai conglomerati convenzionali. Questo significa che la pavimentazione può sopportare carichi di traffico maggiori con cedimenti strutturali ridotti. Un miglioramento delle caratteristiche si ha anche nel caso della resistenza a trazione indiretta (ITS), per la quale si osserva un incremento di circa il 70% nelle miscele modificate rispetto a quelle di riferimento. Questo incremento può essere attribuito alla natura grossolana dell'additivo polimerico.

Impostazione della ricerca

Con riferimento alla ricerca in oggetto, questo documento ha l'obiettivo di valutare, sulla base delle proprietà volumetriche e meccaniche dei campioni di conglomerato bituminoso prodotti in laboratorio, l'effetto sinergico di scheletro litico e plastica, esplorando differenti curve granulometriche e percentuali di polimero. Nello spirito del progetto delle miscele, individuati i contenuti di bitume ottimali si vuole verificare se l'impiego di polimero in sostituzione parziale del bitume possa rivelarsi un'azione promettente per lo sviluppo di una nuova gamma di prodotti su scala industriale.

Progetto Green Roads

Il lavoro si inquadra nell'ambito del progetto Green roads, il quale, nasce dalla collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino e l'azienda Brillada S.r.l. sita in Borgaro Torinese (Torino, Piemonte) e produttrice di conglomerati bituminosi. Il progetto, finanziato dalla Regione Piemonte, è finalizzato alla produzione su scala industriale di miscele bituminose con l'intento di incorporare, oltre al granulato di recupero (RAP), il rifiuto plastico altrimenti destinato a discarica o inceneritore. Da un punto di vista tecnico, questo si traduce nella ricerca delle ricette ottimali, in termini di bitume di apporto, dosaggio degli aggregati costituenti lo scheletro litico e di frazione polimerica di aggiunta per i tre diversi strati di pavimentazione stradale: usura, collegamento e base. Il tutto avviene nel rispetto dei CAM (Criteri Minimi Ambientali) e nell'osservanza delle prescrizioni stabilite dal Capitolato speciale d'appalto ANAS del 2020 contenente le Norme Tecniche sulle pavimentazioni stradali e autostradali.

Struttura del lavoro

Il raggiungimento degli obiettivi anticipati in precedenza è stato perseguito partendo da una ricerca nella letteratura scientifica di approcci di mix design innovativi che prevedono l'impiego di polimeri altrimenti destinati a rifiuto, andando a ricercare le soluzioni più compatibili con gli strumenti disponibili presso il Laboratorio di materiali stradali del Politecnico di Torino.

Il documento si articola sui seguenti capitoli:

1. **Miscele bituminose sostenibili:** contiene alcuni studi significativi presenti in letteratura circa l'incorporamento delle plastiche da rifiuto all'interno dei conglomerati bituminosi e le tecnologie correlate;
2. **Programma sperimentale:** in questo capitolo si introducono in maniera specifica gli obiettivi relativi al lavoro di tesi in oggetto, ponendo attenzione anche alle ipotesi di partenza che sono state considerate per il raggiungimento degli stessi. Vengono inoltre esposte le normative e le linee guida prese come riferimento;
3. **Sperimentazione in laboratorio:** costituisce la descrizione delle prove che sono state svolte in laboratorio con riferimento alla caratterizzazione e la produzione dei materiali di partenza e dei conglomerati ottenuti.

4. **Analisi dei risultati:** in questo capitolo vengono analizzati gli effetti volumetrici e in termini di proprietà meccaniche, quali rigidezza e resistenza a trazione indiretta, legati alle variabili di progetto analizzate;
5. **Conclusioni**

1 Miscele bituminose sostenibili

Nel corso degli anni sono stati condotti diversi studi che trattano l'incorporazione delle plastiche all'interno delle miscele bituminose. Questi studi propongono diverse metodologie riconducibili a due approcci di modifica diversi: metodo wet e metodo dry (Movilla–Quesada et. al., 2019).

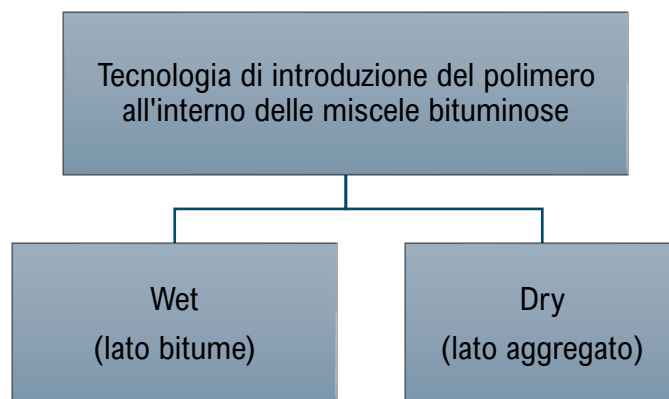


Figura 1.1 Metodologie di introduzione dei polimeri all'interno delle miscele bituminose

1.1 Metodo wet

Il metodo *wet* (umido) consiste nel mescolare preventivamente la plastica con il bitume caldo. In questo processo, il polimero viene aggiunto al legante bituminoso prima di essere mescolato con gli aggregati. La tipica procedura prevede che il bitume, disposto in appositi contenitori, venga inserito in un forno termoelettrico. Al raggiungimento di una temperatura idonea per la lavorabilità viene immerso un miscelatore ad alto taglio impostato ad una velocità di circa 4000 giri/min. Successivamente il polimero viene aggiunto gradualmente (circa 5 g/min) mantenendo la temperatura costante, con una tolleranza di $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Polacco et. al., 2005). Questa tecnica richiede solitamente temperature elevate e tempi di miscelazione prolungati per garantire che la plastica si dissolva o si disperda correttamente nel bitume, modificandone le proprietà reologiche. Risulta pertanto essere più adatto alle plastiche con basse temperature di fusione che si comportano fin da subito come modificatori del legante.

Alcuni studi in letteratura hanno evidenziato come il polietilene lineare a bassa densità mostri una maggiore compatibilità con il bitume, e porti al confezionamento di legante per miscele bituminose con proprietà meccaniche notevolmente migliorate rispetto ai bitumi tal quali (Polacco et. al., 2005).

Un vantaggio importante legato a questa metodologia sta di sicuro nell'ottenimento di un legante modificato più omogeneo. Tuttavia, si riscontrano anche diversi punti a sfavore, tra cui il fatto che richiede attrezzature specifiche e un elevato consumo energetico. Inoltre, non tutti i tipi di plastica si sciolgono facilmente nel bitume, il che può causare problemi di stabilità durante lo stoccaggio; pertanto, tale metodo risulta più indicato per plastiche che hanno un basso punto di fusione.

1.2 Metodo *dry*

Nel metodo *dry* (a secco), i rifiuti plastici vengono aggiunti direttamente nel macchinario di miscelazione insieme agli aggregati preriscaldati, agendo in parte come un sostituto di una frazione degli aggregati e in parte come modificatore del legante durante la fase di miscelazione finale (il bitume viene inserito solamente in seguito alla stabilizzazione termica). Nella fase di miscelazione, l'aggiunta delle plastiche, determina la formazione di una fase nota in letteratura come PCA (Polymer Coated Aggregate) ovvero uno stato dell'aggregato in cui questo risulta essere ricoperto da un sottile strato di materiale plastico.

Si tratta di un processo più semplice ed economico che può essere implementato direttamente negli impianti di produzione standard; infatti, non richiede modifiche costose agli impianti di produzione dell'asfalto, inoltre permette di trattare quantità maggiori di scarti plastici. Di contro la distribuzione del polimero può essere meno uniforme rispetto al metodo a umido e le proprietà finali dipendono fortemente dalla dimensione dei frammenti di plastica utilizzati. Un ulteriore vantaggio del metodo *dry* è dovuto alla formazione del PCA; infatti, in questa tecnologia lo scarto plastico non ha solamente funzione "riempitiva", ma a causa delle alte temperature di miscelazione (circa 160-170°C), la superficie delle particelle plastiche inizia a fondersi depositandosi sulla superficie degli aggregati, migliorando l'adesione tra bitume e gli stessi e creando una struttura interna più rigida.

Nella modifica dei conglomerati le tipologie di rifiuto plastico prevalentemente utilizzate sono costituite prevalentemente da rifiuti termoplastici, che quindi hanno l'attitudine ad essere fusi e rimodellati ripetutamente. Si tratta di materiali che possono presentare punti di fusione più elevati rispetto a quelli prediletti per il metodo *wet* e tra i più comuni si includono il polietilene (PE), il polipropilene (PP), il polistirene (PS), il polietilene tereftalato (PET) e il cloruro di polivinile (PVC).

Quello che trova maggiore impiego nel settore infrastrutturale è sicuramente il polietilene (PE), grazie alla sua buona compatibilità con la matrice bituminosa. In genere lo si può dividere in due famiglie:

- **Polietilene a bassa densità (LDPE):** spesso derivante da pellicole e sacchetti, viene utilizzato per migliorare la flessibilità e la resistenza alla fessurazione alle basse temperature.
- **Polietilene ad alta densità (HDPE):** caratterizzato da una maggiore rigidità e temperatura di fusione (può venire impiegato per aumentare la resistenza alle deformazioni permanenti e il modulo di rigidità delle pavimentazioni).

Sulla base del metodo di incorporazione e della tipologia di plastica impiegata si riscontrano comportamenti differenti del polimero di aggiunta in termini di azione strutturante (prendendo parte alla fase inerte) e partecipazione alla fase legante.

Comportamenti diversi sono evidenziati anche da modifiche dello stesso iter di miscelazione (Radeef et. al., 2021). Si può infatti distinguere tra metodo dry convenzionale e metodo dry modificato. Nello spirito dello studio citato il primo prevedeva il riscaldamento dell'aggregato a 180 °C per 2h, successivamente l'incorporazione delle plastiche e quindi l'aggiunta del bitume. La procedura modificata invece prevede una serie di fasi successive schematizzate in Figura 1.2. Si inizia con il riscaldamento dell'aggregato grossolano (>3,35 mm) a 180 °C con graduale introduzione delle plastiche da riciclo e una miscelazione di 4 minuti. Successivamente si prosegue con l'incorporazione del 17 % di bitume e una miscelazione di 2 minuti. Dopodiché avviene l'aggiunta degli aggregati fini e il resto del bitume, quindi una miscelazione fino a raggiungere l'omogeneità.

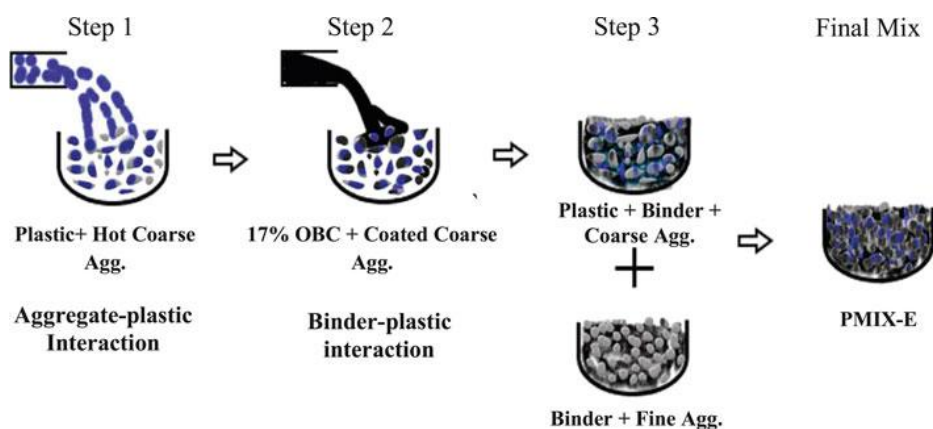


Figura 1.2 Esempio di metodo dry modificato

Dall'analisi di queste due metodologie di incorporazione delle plastiche, si riscontrano comportamenti differenti nell'interazione tra plastiche e conglomerato. Nel caso convenzionale l'aggiunta delle plastiche può portare a una deviazione della struttura dell'aggregato, mostrando risultati non costanti specialmente con elevati contenuti di polimero di aggiunta, in quanto questo, fondendo, si comporta da fase legante tra gli aggregati fini promuovendo la formazione di cluster che alterano la struttura volumetrica finale della miscela. Nel caso del metodo modificato, si riscontra invece un'interazione più efficace tra plastica e il solo aggregato grossolano, assistendo alla formazione di PCA in cui il film polimerico si presume possa aumentare le capacità adesive tra gli aggregati. Si denota infatti un miglioramento sostanziale delle prestazioni in termini di resistenza all'ormaiamento, deformazione da scorrimento e modulo resiliente.

Per quanto attiene alle proprietà volumetriche, le variazioni sono associate principalmente a problemi di controllo della miscelazione, non tanto in termini di percentuale dei vuoti ma piuttosto alla VFB (voids filled by binder). Infatti, a prescindere dal metodo impiegato la percentuale dei vuoti non varia significativamente: si nota sempre un aumento legato più che altro alla percentuale di plastiche introdotte. Invece, per quanto riguarda la VFB, all'aumentare del contenuto di plastica si osserva una variazione considerevole solamente per le miscele realizzate mediante il metodo convenzionale, in ragione del fatto che in questa situazione la granulometria grossolana sarà in percentuale maggiore dal momento che è favorita la formazione dei cluster composti da plastica e aggregati fini.

Una più marcata dipendenza dalla metodologia di procedura impiegata, si osserva nel caso del modulo resiliente. Con il metodo dry modificato si riscontrano valori del modulo di rigidezza più elevati (per altro più vicini a quelli delle miscele di controllo) rispetto a quelli delle miscele realizzate con il metodo convenzionale.

Ciò potrebbe essere dovuto all'elevata adesione del bitume con l'aggregato rivestito, che può anche essere dovuta all'azione della plastica. L'aumento del modulo resiliente potrebbe anche essere dovuto alla presenza di rivestimenti di plastica sugli aggregati che potrebbero potenzialmente assumere il ruolo di strati di smorzamento per lo stress applicato, il che porta all'assorbimento di una maggiore energia di deformazione elastica piuttosto che di deformazione plastica (Vila – Cortavitarre et. al., 2019).

Per quanto riguarda la composizione, la prova di setacciatura ha permesso di confrontare i trattenuti e i passanti ai vari setacci. Quello che si osserva è che, con l'incorporazione delle plastiche, gli aggregati tendono a formare composti più grossolani; pertanto, diminuisce il

trattenuto ai setacci piccoli e aumenta per quelli più grandi. Di conseguenza si può pensare che la plastica si comporti come un adesivo tra le particelle di aggregato e questo gli impedisce di sciogliersi all'interno della miscela.

Infine, nonostante non siano oggetto di tesi, si possono citare alcuni vantaggi legati al miglioramento delle proprietà tecniche e delle prestazioni funzionali. L'aggiunta del polimero, infatti, determina una riduzione dell'assorbimento di umidità fino a valori quasi nulli (Vasudevan et. al., 2012) e questo comporta anche una riduzione della suscettibilità al fenomeno di stripping: si osserva infatti una percentuale di superficie degradata pari allo 0% anche dopo le 96h di immersione in acqua a 40 °C, laddove la miscela tradizionale inizia a perdere bitume già dopo le 24h.

Dal punto di vista prestazionale invece, si riscontrano dei miglioramenti dal punto di vista della deflessione superficiale, dell'indice di rugosità superficiale (IRI) e dello skid number, il quale misura l'aderenza che deve rispettare certi valori per garantire un certo grado di sicurezza. In primis si osserva che la deflessione, per le strade con plastiche, fornisce risultati entro i limiti anche dopo i 5 – 6 anni. Anche da un punto di vista della rugosità superficiale si osserva un miglioramento: si ha una riduzione dell'indice IRI (International Roughness Index) anche del 20% il che garantisce un maggiore rispetto dei limiti. Infine, il valore di Skid Number risulta inferiore nelle strade PCA indicando un'aderenza migliore e più costante rispetto al bitume comune, che tende a diventare scivoloso a causa del fenomeno di "bleeding" e garantendo così un maggiore grado di sicurezza.

1.3 Mix design

La composizione ottimale di un conglomerato bituminoso non può essere definita in maniera univoca ma va determinata attraverso un adeguato studio di laboratorio. A parità di componenti infatti è possibile individuare anche più ricette di progetto, ciascuna in grado di soddisfare specifici requisiti prestazionali, orientando dunque la scelta finale in relazione alla destinazione d'uso del materiale (Santagata F. et al., 2016).

Indipendentemente dalla procedura adottata, le fasi essenziali relative al progetto della miscela bituminosa si possono riassumere in:

- Qualificazione dei materiali e dei componenti;
- Definizione della miscela degli aggregati;
- Determinazione del dosaggio di legante e di eventuali additivi.

La qualificazione dei materiali riguarda sia gli aggregati lapidei che il legante bituminoso che, a prescindere da come vengono combinati devono presentare proprietà intrinseche tali da rendere adeguati al tipo di applicazione a cui sono destinati.

La miscela degli aggregati deve soddisfare dei prefissati limiti granulometrici stabiliti in relazione al tipo di materiale e allo strato della pavimentazione. Generalmente si fa riferimento a un fuso granulometrico definito a cavallo di una curva di distribuzione ottimale, oppure a carte di controllo redatte, al variare del diametro nominale massimo, in opportune scale di rappresentazione. Il dosaggio ottimale del legante viene infine stabilito dall'esame comparato dei parametri volumetrici e meccanici ottenuti da più miscele di tentativo, preparate adottando la composizione lapidea definita precedentemente e variando il contenuto di legante.

Nel seguito vengono descritte le due tipologie di mix design più conosciute: il metodo SUPERPAVE, che costituisce il riferimento più avanzato, e il metodo Marshall, che risulta essere quello più storico (ormai in disuso).

1.3.1 SUPERPAVE mix design

La metodologia di mix design SUPERPAVE è basata sostanzialmente sulla base di parametri prestazionali legati alla risposta del materiale in opera. Si possono distinguere i parametri detti *performance-based*, ottenuti da una stima diretta dei principali fenomeni di degrado, da quelli detti *performance-related*, legati invece alla volumetria. Il sistema è articolato su tre differenti livelli relativi alla soglia di traffico per cui la pavimentazione deve essere progettata:

- *Livello 1*: $ESAL < 10^6$;
- *Livello 2*: $10^6 < ESAL < 10^7$;
- *Livello 3*: $ESAL > 10^7$;

Sulla base del livello richiesto variano gli oneri sperimentali.

La struttura generale del metodo SUPERPAVE si può suddividere in tre blocchi principali.



Figura 1.3 Struttura generale del metodo SUPERPAVE

Il primo blocco è legato alla selezione e al proporzionamento volumetrico di materiali componenti, il secondo alla misura delle proprietà meccaniche e l'ultimo al controllo di campo durante la produzione e l'esecuzione dei lavori.

L'aspetto più importante nella procedura di mix design è sicuramente quello relativo alla progettazione volumetrica in quanto consiste nella determinazione della ricetta ottimale. Questa fase si fonda essenzialmente nell'uso della pressa a taglio giratoria (PTG) attraverso la quale si possono esplorare vari gradi di compattazione della miscela prodotta. In particolare, vengono fissati determinati valori del livello di compattazione:

- $C_{iniziale}$: costituisce il grado di auto addensamento che se troppo elevato permette di comprendere se il conglomerato è troppo cedevole;
- C_{design} : corrispondente al numero di rotazioni che riproducono la situazione che si avrà in situ (a questo grado viene associato il valore ottimale dei vuoti fissato al 4%);
- C_{max} : utile per controllare che non avvenga un'eccessiva riduzione dei vuoti.

La progettazione volumetrica si articola a sua volta in diverse fasi finalizzate alla determinazione del dosaggio ottimale dei vari materiali in gioco (vedi Figura 1.5).

- **Fase 1 – Selezione degli aggregati:** si selezionano gli aggregati in accordo con opportuni requisiti fisici e geometrici, per i quali è concesso fare riferimento alle prescrizioni stabilite dalle norme tecniche di capitolato;
- **Fase 2 – Selezione del legante:** è necessario stabilire la classe prestazionale del legante da utilizzare sulla base delle temperature massime e minime di progetto della pavimentazione;
- **Fase 3 – Esplorazione di diverse distribuzioni granulometriche:** vengono preparate molteplici distribuzioni granulometriche definite in accordo con i punti di controllo a seconda del diametro nominale massimo. Alternativamente si possono selezionare le miscele lapidee di tentativo all'interno di un fuso granulometrico di riferimento;
- **Fase 4 – Calcolo del bitume di primo tentativo:** per ciascuna distribuzione granulometrica si determina un quantitativo di bitume di primo tentativo. In letteratura vi sono diversi metodi per questo passaggio, per esempio:

$$P_{Bi} = \frac{100 \cdot MV_B \cdot (V_{BE} + V_{BA})}{(MV_B \cdot (V_{BE} + V_{BA})) + W_G}$$

con:

$$W_G = \frac{P_G \cdot (1 - V_A)}{\left(\frac{P_B}{MV_B}\right) + \left(\frac{P_G}{MV_B}\right)}$$

dove con MV si intende la massa volumica relativa ai vari materiali (B – bitume, G – aggregato, A – vuoti), mentre con P i rispettivi rapporti ponderali. Infine, V è riferito al volume;

- **Fase 5 – Selezione della distribuzione granulometrica:** la scelta della curva granulometrica viene fatta sulla base di alcune condizioni di riferimento, per esempio il volume dei vuoti posto al 4% per un grado di compattazione corrispondente a N_{design} ;
- **Fase 6 – Variazione del bitume di primo tentativo:** si preparano diverse miscele variando il contenuto di bitume di primo tentativo (ponendo per esempio uno scarto del 0.5%);
- **Fase 7 – Determinazione del dosaggio di bitume ottimale:** diagrammando i risultati ottenuti a N_{design} , in funzione del contenuto di bitume si determina il dosaggio corrispondente a un volume dei vuoti pari a 4%.

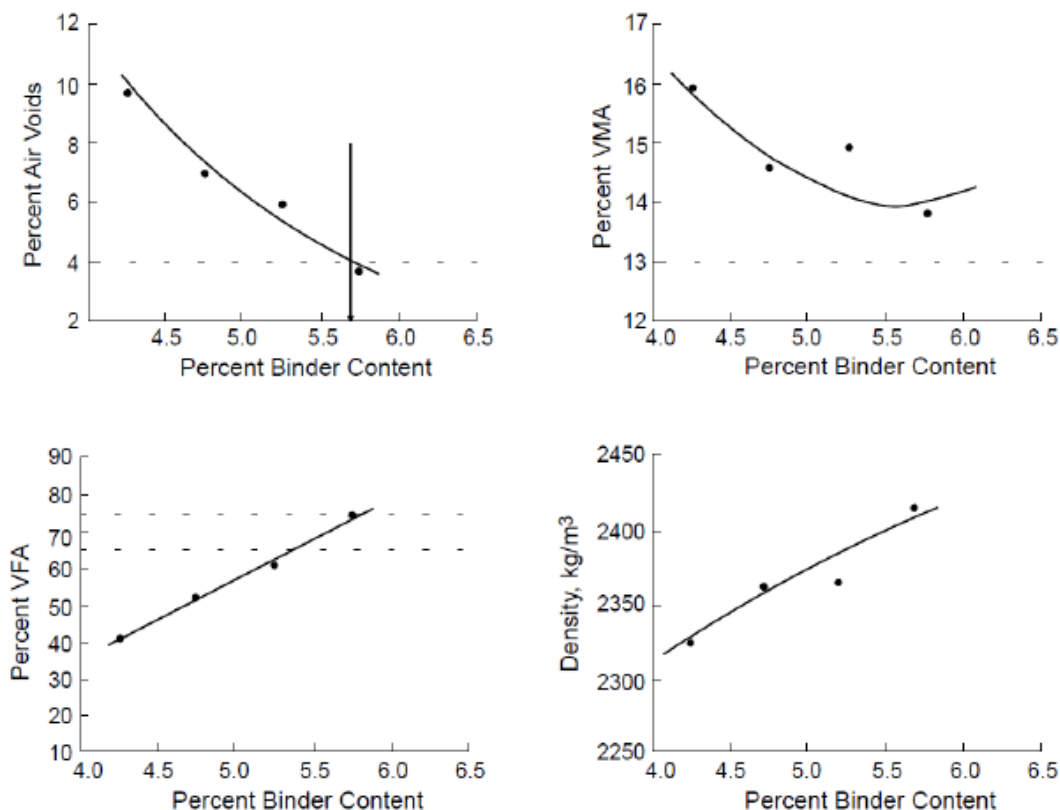


Figura 1.4 Variazione dei parametri volumetrici al variare della percentuale di legante

Come si può evincere da quanto riportato, vi è una prescrizione che condiziona fortemente la procedura di proporzionamento volumetrico ed è relativa al vincolo del volume dei vuoti posto in maniera univoca al 4%. Tuttavia, le miscele bituminose presentano un comportamento meccanico ottimale all'interno di un range del volume di vuoti non necessariamente centrato su tale valore ma che varia invece da materiale a materiale e in relazione alla tipologia dello strato.

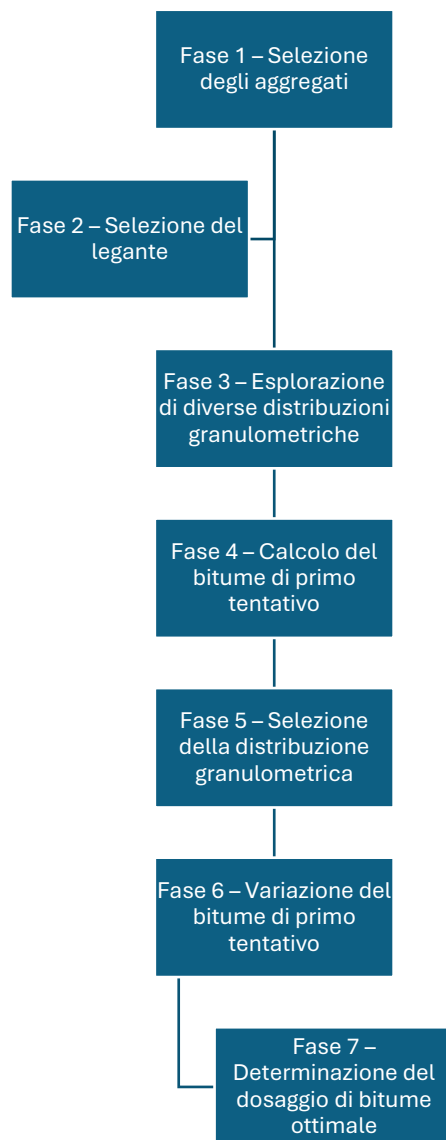


Figura 1.5 Processo di progettazione volumetrica

1.3.2 Marshall mix design

Questo metodo di mix design si basa sulla prova Marshall. La procedura consiste innanzitutto nel caratterizzare i materiali e nel definire la distribuzione granulometrica di progetto (adottando in genere la curva di centro fuso). A questo punto si prosegue con il calcolo di una percentuale di

bitume di primo tentativo utilizzando una formulazione derivata da considerazioni in parte di natura teorica e in parte empirica:

$$\%P^*_B = K \cdot \Sigma^{\frac{1}{5}}$$

Dove il termine Σ rappresenta la superficie specifica dell'aggregato che viene valutata anch'essa empiricamente mediante l'equazione di Duriez:

$$\Sigma = \frac{1}{100} \cdot (0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135F)$$

Dove:

- G è la percentuale in peso degli aggregati con dimensione superiore a 10mm;
- g è la percentuale con dimensione compresa tra 5 e 10 mm;
- A è la percentuale con dimensione compresa tra 0.3 e 5 mm;
- a è la percentuale con dimensione compresa tra 0.08 e 0.3 mm;
- F è la percentuale con dimensione inferiore a 0.08 mm (filler);

Il parametro K è detto invece modulo di ricchezza e si stabilisce a seconda della tipologia d'uso del materiale. A parità di superficie specifica, al variare del modulo di ricchezza varia lo spessore medio della pellicola di bitume che ricopre gli aggregati lapidei (in genere si possono adottare: 3.75 per strade a forte traffico, 4.00 per strade con bassi livelli di traffico e 4.25 per strati di usura).

A partire dal valore calcolato di $\%P^*_B$ vengono preparate diverse miscele dove appunto si fa variare tale percentuale generalmente di $\pm 0.5\%$ e $\pm 1\%$, realizzando per ciascuna almeno quattro provini cilindrici mediante il compattatore Marshall, i quali vengono caratterizzati volumetricamente e quindi sottoposti alla prova per la misura a stabilità e scorrimento. Il dosaggio finale viene stabilito in modo da ottimizzare, nel rispetto di tutti i limiti imposti, il comportamento della miscela. La percentuale corrispondente alla massima stabilità Marshall non corrisponde in genere al contenuto di bitume ottimale in quanto esso non rende minimo lo scorrimento, ma la scelta ricade spesso su un valore leggermente inferiore in modo da ottenere una maggiore rigidità complessiva.

2 Programma sperimentale

Nel seguito vengono delineati gli obiettivi della ricerca, muovendo dalle ipotesi preliminari che hanno guidato la definizione del campo di variazione delle grandezze indagate. Tale selezione è stata operata garantendo la piena congruenza con le prescrizioni di Capitolato e la conformità ai Criteri Ambientali Minimi (CAM Strade). In ultima analisi, viene introdotta la metodologia sperimentale adottata per lo sviluppo delle diverse fasi operative del progetto

2.1 Obiettivi

Nello spirito del progetto Green roads, l'obiettivo dello specifico del lavoro di tesi consiste nel ricercare la migliore distribuzione granulometrica di aggregati e RAP, nonché il quantitativo ottimale di bitume vergine di apporto, proponendo una sua eventuale riduzione in favore di un proporzionale apporto di plastiche da riciclo. L'individuazione dei valori ottimali viene svolta sulla base dell'analisi dei vuoti, utilizzando un approccio simile a quello esposto al paragrafo 1.3.1, facendo riferimento quindi a una percentuale target dei vuoti del 4% in accordo con quelli che sono i requisiti volumetrici richiesti dalle normative vigenti, indicati nel dettaglio al paragrafo 2.2.

Il perseguimento di tali obiettivi ha richiesto l'analisi del comportamento delle plastiche e la loro influenza sulla miscela, sempre in termini di volumetria e caratteristiche meccaniche, utilizzando come variabili la loro morfologia, i dosaggi impiegati e la temperatura di miscelazione. La variazione delle caratteristiche dei conglomerati è funzione anche della distribuzione granulometrica. Al fine di comprendere quale fosse l'incidenza di quest'ultima sulle miscele e determinare l'entità del comportamento strutturante delle plastiche si è reso necessario esplorare diverse configurazioni relative al dosaggio degli inerti, il che si è tradotto in termini applicativi nel considerare tre diverse curve granulometriche.

Sulla base di quanto appena esposto appare chiaro che il mix design risulta essere il prodotto di una serie di variabili riassumibili di seguito:

- Percentuale di plastiche di apporto;
- Percentuale di bitume vergine di apporto;
- Scheletro litico impiegato;
- Temperatura di miscelazione;
- Temperatura di compattazione.

L'approccio sperimentale prevede che ogni variabile venga scelta con criterio, seguendo i metodi noti dalla letteratura (SUPERPAVE mix design) e sulla base di ipotesi derivanti da studi pregressi. La matrice degli esperimenti adottata in quest'ambito considera come fattori da esplorare i primi tre esposti, con l'obiettivo di valutare i risultati per diverse combinazioni di dati di ingresso e poter così formulare una serie di ipotesi volte a rispondere agli obiettivi del lavoro. Per gli scheletri litici 1 e 2 vengono esplorate specifiche combinazioni per mettere in confronto l'effetto di una differente curva granulometrica sulle proprietà finali, mentre per la classe 3, mediante la produzione di 10 miscele sperimentali, si è esplorato un dominio più ampio in termini di bitume di apporto e contenuto di plastica nella miscela, per ottenere dei trend.

Tabella 2.1 Matrice degli esperimenti adottata

W.P.M (%)		0				0.4			0.8		
B.A.A (%)		2.87	3.37	3.57	3.77	3.37	3.57	3.77	3.37	3.57	3.77
Scheletro litico	1	-	-	-	2	-	1	-	2	-	1
	2	-	-	-	1	-	1	-	1	-	1
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Al fine di perseguire gli obiettivi prefissati, come dettagliato nel capitolo successivo, il piano sperimentale ha previsto la formulazione di miscele caratterizzate da differenti dosaggi dei componenti, assunti quali variabili di progetto. La fase di confezionamento dei campioni è stata eseguita mediante protocolli di miscelazione controllata, propedeutici alle successive indagini di laboratorio. I provini sono stati inizialmente sottoposti a caratterizzazione volumetrica per la determinazione dell'indice dei vuoti (grado di apertura); successivamente, si è proceduto alla caratterizzazione meccanica mediante misura della rigidità e determinazione dell' ITS (prova distruttiva). L'attività sperimentale si è conclusa con la verifica dei dosaggi effettivi, analizzando il contenuto di legante e la distribuzione granulometrica degli aggregati.

2.1.1.1 Percentuale di plastiche di apporto

La percentuale di plastiche di apporto è calcolata sulla massa totale della miscela, calcolata come di seguito:

$$\%WP.M = \frac{M_{wp}}{M_m}$$

Le percentuali che si intendono esplorare sono 0.4% WP.M e 0.8% WP.M.

2.1.1.2 Percentuale di bitume di apporto

Innanzitutto, la percentuale di bitume vergine di apporto viene calcolata sulla massa totale degli aggregati.

$$\%BA.A = \frac{M_b}{M_a}$$

Nel metodo del mix design volumetrico il bitume di apporto da inserire nella miscela viene determinato mediante diversi step partendo dalla determinazione della percentuale di bitume di primo tentativo. Nel caso in esame, tale valore corrisponde a 3.77% ed è relativo alla miscela di collegamento ottima prodotta dal Produttore. Il mix design dopodiché si pone l'obiettivo di ricercare il quantitativo di bitume tale per cui la percentuale dei vuoti risulti essere quella ottimale, che per il numero di giri a N_{design} è il 4%.

In questo caso però la variazione dei contenuti di bitume è stata scelta sulla base di ipotesi derivanti da studi precedenti sempre appartenenti al progetto Green roads. L'ipotesi di partenza è quella per cui il tasso di sostituzione %BA.A/%WP.M abbia un valore del 50%, il che significherebbe che le plastiche si comportano per metà come fase legante e per l'altra metà come fase inerte. Pertanto, all'introduzione del 0.4% WP.M corrisponderebbe un 3.57% BA.A, mentre a per un 0.8% WPA si avrebbe 3.37% BA.A.

2.1.1.3 Scheletro litico

La definizione dello scheletro litico in genere può seguire due approcci: il primo è quello di selezionare la miscela lapidea sulla base dell'ottimizzazione effettuata mediante il Risolutore del foglio di calcolo, il quale prevede la minimizzazione di RSME tra la curva di riferimento, corrispondente al centro fuso fornito dal Capitolato ANAS, e la curva di progetto. Il secondo metodo prevede invece la preparazione di diverse distribuzioni di tentativo, sempre in conformità ai limiti granulometrici, successivamente si seleziona la migliore dall'analisi delle curve sperimentali e riconducendosi a una condizione di riferimento, corrispondente in genere al volume dei vuoti a N_{design} .

L'approccio scelto nel caso in esame è più simile alla seconda metodologia: sulla base di studi pregressi sono state quindi selezionate diverse distribuzioni granulometriche e si è indagato

l'effetto che queste esercitavano in particolare sulle proprietà meccaniche delle miscele. Questo tema è stato trattato più nello specifico all'interno del paragrafo 0.

2.1.1.4 *Protocollo termico*

La determinazione delle temperature di miscelazione e di compattazione è stata effettuata in stretta conformità con i requisiti definiti dai **Criteri Minimi Ambientali (CAM)**, precedentemente illustrati al paragrafo 2.3. Il regime termico sperimentale è dunque definito dalla sinergia tra le due variabili termiche citate; nel caso specifico della presente indagine, tale combinazione è stata codificata secondo il seguente protocollo:

- **Protocollo termico A:** $T_{\text{mix}} = 180^{\circ}\text{C} - T_{\text{comp}} = 145^{\circ}\text{C}$

È opportuno precisare che l'adozione di una specifica nomenclatura per il protocollo impiegato risponde alla necessità di isolare l'influenza della variabile termica sulla matrice bituminosa. Come evidenziato dalla letteratura scientifica di riferimento, il comportamento reologico e meccanico delle componenti plastiche all'interno della miscela è infatti strettamente dipendente dalle temperature di lavorazione. Sebbene l'attuale analisi si sia focalizzata su un unico set di valori, la struttura metodologica adottata consente di estendere la ricerca a differenti regimi termici, al fine di valutare la sensibilità dei polimeri alle variazioni di temperatura in fase di produzione.

2.2 Rispetto dei requisiti (CAM e capitolato)

Il decreto del 5 agosto 2024, emanato dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, introduce i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento dei servizi di progettazione e per l'esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali.

Nel contesto del presente lavoro, l'osservanza di tali criteri può essere concretamente tradotta nel rispetto della temperatura massima di posa dei conglomerati bituminosi pari a 140°C . Da un punto di vista operativo, ciò implica che, all'interno della campagna sperimentale, la temperatura di compattazione dei provini debba essere impostata in modo coerente a tale limite.

Sebbene i CAM definiscano una serie di prescrizioni da adottare prevalentemente nella fase di produzione, il Capitolato ANAS stabilisce che le miscele prodotte rispettino determinate caratteristiche. Nella fattispecie, con riferimento allo strato di collegamento, i requisiti da rispettare riguardano innanzitutto lo scheletro litico, i cui limiti sono riportati nella Tabella 2.3.

Tabella 2.2 Limiti ANAS fuso granulometrico (collegamento)

Apertura setacci UNI	passante totale in peso %
setaccio 20	100
setaccio 16	90-100
setaccio 12,5	66-86
setaccio 8	52-72
setaccio 4	34-54
Setaccio 2	25-40
Setaccio 0,5	10-22
setaccio 0,25	6-16
setaccio 0,063	4-8

La quale può essere rappresentata graficamente come indicato nel *Grafico 2.1*.

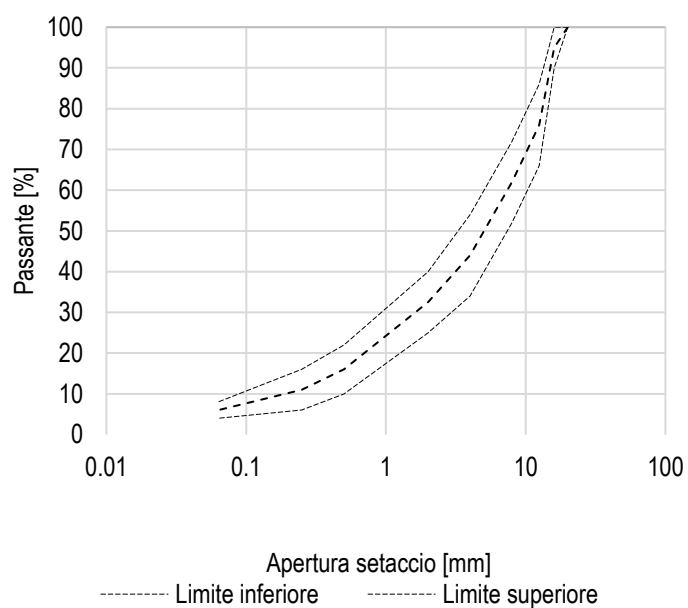


Grafico 2.1 Limiti ANAS fuso granulometrico (collegamento)

Ai fini di verificare le caratteristiche volumetriche e meccaniche dovranno essere realizzati provini con pressa giratoria rispettando i seguenti parametri di prova:

Tabella 2.3 Parametri di prova per la produzione dei campioni

	Usura A e B	Binder	Base e basebinder
Pressione verticale kPa	600 ± 3		
Angolo di rotazione	1,25 ± 0,02		
Velocità di rotazione (giri/min)	30		
Diametro provino (mm)	100	100	150
Numero di giri totali (N3)	210	180	180

La verifica della percentuale dei vuoti deve essere fatta a tre livelli di numero di giri: N1 (iniziale), N2 (medio) e N3 (finale). I requisiti di accettazione disposti da ANAS, relativamente allo strato di collegamento (Binder) sono i seguenti:

Tabella 2.4 Requisiti di accettazione - caratteristiche volumetriche

	binder			% vuoti (Vm UNI EN 12697-8)
	TQ	SF	HD	
N1	10	10	10	11-15
N2	100	110	120	3-6
N3	180	190	200	≥ 2

Gli altri requisiti da verificare riguardano i parametri ottenuti dalla prova di trazione diametrale a 25°. Si tratta di Rt (resistenza a trazione indiretta) e CTI (coefficiente di trazione indiretta).

Tabella 2.5 Requisiti di accettazione – caratteristiche meccaniche

	Miscele con bitume TQ	Miscele con bitume SF e HD
Rt (GPa x 10 ⁻³)	0,72 – 1,40	0,95 – 1,70
CTI (GPa x 10 ⁻³)	≥ 65	≥ 75

3 Materiali e metodi

La fase di sperimentazione in laboratorio si è svolta presso il Laboratorio di Materiali Stradali (LMS) del dipartimento DIATI del Politecnico di Torino. All'interno di questo Capitolo vengono riportate le varie attività svolte al fine di perseguire gli obiettivi esposti al paragrafo 2.1.

3.1 Materiali

I costituenti le miscele bituminose innovative constano di una serie di materiali opportunamente dosati e combinati al fine di ottenere i prodotti finali. Si tratta di aggregati minerali e RAP, bitume e eventuali additivi inseriti, tra i quali le plastiche.

3.1.1 Aggregati e RAP

Gli aggregati costituiscono lo scheletro portante della miscela (circa il 90-95% in peso) e la loro selezione è mirata a garantire il mutuo incastro e la resistenza ai carichi. Sulla base dei requisiti granulometrici richiesti dal Capitolato, il Produttore ha fornito indicazioni sulle diverse frazioni granulometriche che, nel caso dello strato di collegamento, vengono impiegate. Si tratta di:

- Filler;
- 0/5 Sabbia;
- 5/15 Pietrischetto;
- 15/25 Pietrisco.

La caratterizzazione delle suddette si basa, nello specifico, nella determinazione della massa volumica (necessaria, per esempio, per il calcolo matematico della massima massa volumica delle miscele) e della distribuzione granulometrica (necessaria invece per il tracciamento della curva granulometrica).

3.1.1.1 Determinazione della densità volumica degli aggregati

Il metodo impiegato per la determinazione della massa volumica degli aggregati è quello dei picnometri, riportato nella norma EN 1097-6, Allegato H. Per poter applicare questo metodo innanzitutto è necessario ridurre il provino lapideo in provini più piccoli basandosi sulle indicazioni fornite dalla norma (riportate in Tabella 3.1) e servendosi del metodo di ripartizione meccanica mediante riffle box, la cui procedura è indicata nella norma EN 12697-28. La massa volumica che viene calcolata è pre-essicata a 110 °C e successivamente ridotta ulteriormente con il metodo

della quartatura manuale (riportata in seguito al punto 3.2.3.1) in modo poter essere introdotta all'interno dei picnometri.

Tabella 3.1 Campioni di prova per la determinazione della massa volumica

Materiale	D (mm)	m_{min} [g]	m [g]
Sabbia 0/5	5	500	1000
Ganiglia 3/8	8	500	1000
Pietrischetto 5/17	17	1032	2500
Pietrisco 15/25	25	1290	1500
Filler		100	100
Rap 0/20	20	1129	1400
Rap 0/6	6	500	600

Una volta introdotta la massa di aggregato all'interno del picnometro può essere effettuata la pesatura in aria, nella quale il picnometro, compreso del tappo, viene pesato riempito con l'aggregato. A questo punto viene introdotta l'acqua distillata attenționando il fatto di lasciare 2-3 cm di differenza tra il materiale e il pelo libero. Dal momento che il materiale può contenere tracce di aggregato fine è necessario aspettare almeno 4h perché tali frazioni abbiano il tempo di sedimentare e successivamente è possibile procedere con la deaerazione dell'acqua distillata, in modo tale da eliminare tutta l'aria presente all'interno del materiale ed eventualmente del fluido. Questo processo è materializzabile azionando un apposito macchinario disponibile in laboratorio (si veda la Figura 3.1) per un periodo di circa 30 min, avendo cura di scuotere i picnometri in questo arco temporale.



Figura 3.1 Deaerazione degli aggregati

Successivamente alla fase di deaerazione avviene il riempimento completo del picnometro fino a formare un menisco in corrispondenza della sommità del tappo, con acqua previamente deaerata. Viene quindi pesato il picnometro comprensivo di materiale e acqua.

Si può dunque procedere con il calcolo della massa volumica, servendosi della seguente equazione:

$$\rho_p = \frac{M_1}{V - \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{\rho_w}}$$

Dove:

- M_1 è la massa del provino (g);
- M_2 è la massa del picnometro comprensivo del tappo, del materiale e dell'acqua (g);
- M_0 è la massa del picnometro comprensivo del tappo (g);
- V è il volume del picnometro (ml).

Il volume del picnometro richiede una precedente calibrazione e si determina sulla base della seguente relazione:

$$V = \frac{M_3}{\rho_w}$$

Dove:

- M_3 è la massa del picnometro comprensivo del tappo, riempito d'acqua fino a formare il menisco (g);
- ρ_w è la densità dell'acqua a una certa temperatura (Mg/m^3).

La densità dell'acqua, funzione della temperatura t ($^{\circ}C$), viene calcolata tramite la formulazione:

$$\rho_w = 1.00025205 + \left(\frac{7.59 \cdot t - 5.32 \cdot t^2}{10^6} \right)$$

Tabella 3.2 Densità delle varie frazioni granulometriche

Classe aggregati	$\rho_{p,avg}$	St. Dev.
	[Mg/m³]	[Mg/m³]
Filler	2.77	0.02
0/5	2.73	0.00
3/8	2.79	0.01
5/15	2.77	0.00
15/25	2.81	0.03
RAP 0/6	2.55	0.02
RAP 0/20	2.55	0.00

3.1.1.2 Determinazione della distribuzione granulometrica degli aggregati

La distribuzione granulometrica delle varie frazioni di aggregato si ottiene mediante setacciatura secondo la norma EN 933-1 del materiale rappresentativo essiccato a seguito di lavaggio per eliminare il filler. I quantitativi minimi adottati per la riduzione a campione rappresentativo sono riportati in Tabella 3.3. La riduzione avviene tramite la procedura di quartatura meccanica.

Tabella 3.3 Campioni di prova per la determinazione della distribuzione granulometrica

Frazione granulometrica	D (mm)	m_{min} [g]	m [g]
0/5 LMS	5	250	500
3/8 LMS	8	600	1000
5/17 LMS	17	2890	3000
15/25 LMS	25	6250	6500
Filler LMS		200	200
Rap 0/20 LMS	20	4000	4000
Rap 0/6 LMS	6	360	500

La metodologia prevede che il campione subisca un essiccamento per 12h in forno a 110 °C e, successivamente alla pesatura, si procede con il lavaggio dell'aggregato in modo da rimuovere le parti fini e la polvere. A seguito del lavaggio l'aggregato deve essere sottoposto nuovamente a essiccazione e quindi setacciato.

La strumentazione impiegata nella setacciatura si compone di una colonna di setacci dell'apertura indicata in Figura 3.2, la quale viene inserita in un setacciatore meccanico per un periodo di 20 min. Questo, attraverso le vibrazioni favorisce il completo passaggio del materiale tra i setacci.

Apertura setaccio (mm)
32
20.0
16.0
12.5
8.0
4.0
2.0
0.5
0.25
0.063



Figura 3.2 Colonna di setacci utilizzata nella prova di setacciatura

I risultati possono essere rappresentati sia in forma tabellare che grafica. In entrambi i casi vengono riportate le percentuali di passante progressivo ai vari setacci per le varie classi granulometriche.

Tabella 3.4 Distribuzioni delle varie frazioni granulometriche

Apertura setaccio (mm)	Passante [%]				
	filler	Sabbia 0/5	Pietrischetto 5/17	Pietrisco 15/25	Fresato 0/20
32	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
20.0	100.0	100.0	100.0	92.2	100.0
16.0	100.0	100.0	99.6	64.0	96.5
12.5	100.0	100.0	82.1	30.4	91.9
8.0	100.0	100.0	29.6	4.2	75.9
4.0	100.0	81.4	6.1	1.4	52.7
2.0	99.9	46.0	4.3	1.2	38.9
0.5	99.3	20.2	2.5	1.0	20.9
0.25	98.1	13.4	2.0	0.9	14.8
0.063	85.0	4.4	1.2	0.7	8.3

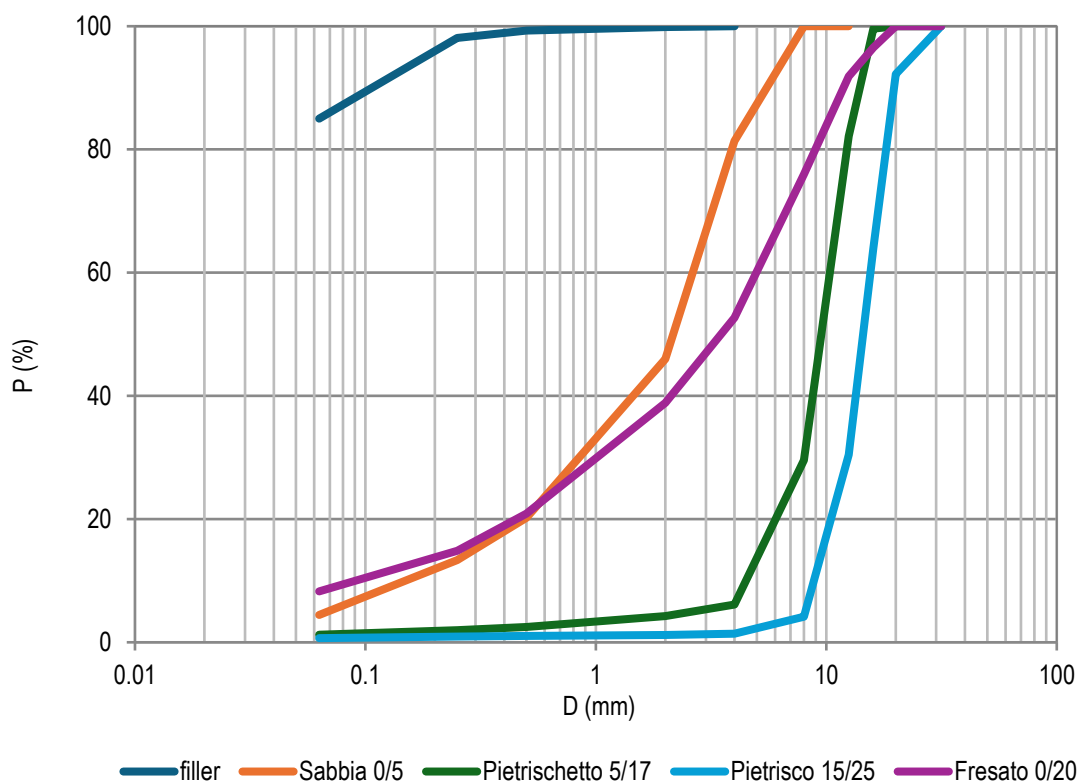


Grafico 3.1 Curve delle varie frazioni granulometriche

3.1.2 Plastiche da recupero

Nello studio condotto per lo strato di collegamento si è utilizzata come plastica additiva al conglomerato un prodotto multicolore rigenerato in forma di scaglie, scarto delle operazioni di riciclaggio meccanico degli imballaggi provenienti dalla raccolta differenziata dei rifiuti urbani (plastica post-consumo) e destinato altrimenti alla termovalorizzazione o a discarica. Il materiale, commercialmente noto come MEGPO, viene classificato come una miscela di poliolefine le cui componenti principali sono il Polietilene (PE), che può essere presente in densità basse (LDPE) oppure alte (HDPE) e il Polipropilene (PP). Questi due composti hanno punti di rammollimento relativamente elevati e risultano pertanto idonei all'incorporazione mediante tecnologia dry. Il materiale inizia a rammollire in un intervallo compreso tra 130°C e 170°C, perfettamente compatibile con le temperature di produzione del conglomerato bituminoso.

Studi precedentemente condotti dal gruppo di ricerca hanno portato ad una caratterizzazione morfologica del materiale e una valutazione qualitativa del suo comportamento termico, mediante l'utilizzo di protocolli di prova sviluppati ad hoc con il duplice obiettivo di

analizzare l'interazione tra il polimero e l'aggregato alle alte temperature e di valutare l'efficacia con cui il polimero ricopre la superficie dell'inerte. Nel seguito sono richiamati i principali risultati in termini di distribuzione granulometrica, densità e residuo di ignizione.

3.1.2.1 Distribuzione granulometrica di MEGPO

I risultati della distribuzione granulometrica sono riportati in Tabella 3.5 e nel Grafico 3.2

Tabella 3.5 Distribuzione granulometrica delle plastiche MEG

Apertura setaccio (mm)	Passante progressivo (%)
16.0	100.00
12.5	99.76
10.0	95.72
8.0	81.47
6.3	56.64
4.0	16.88
2.0	2.72
1.0	0.36
0.5	0.07
F	0.00

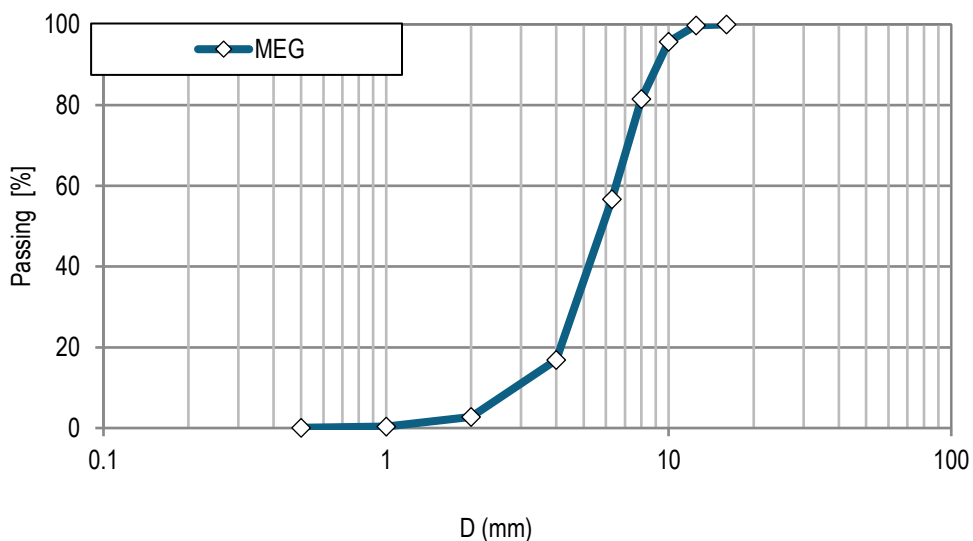


Grafico 3.2 Rappresentazione della distribuzione granulometrica delle plastiche MEG

3.1.2.2 Determinazione del residuo di ignizione

Dal momento che la valutazione della percentuale di bitume effettiva viene eseguita attraverso la prova di ignizione, che verrà poi approfondita al paragrafo 3.2.5, nella massa persa occorre tenere in conto anche del contributo della plastica, la quale solo in parte brucia.

Il residuo della prova di ignizione eseguita sul polimero consente di determinare l'aliquota che non viene mobilitata come fase legante. I risultati riportati in Tabella 3.6, ottenuti su differenti configurazioni di prova, mostrano un residuo in massa medio pari al 21%. Tale valore verrà tenuto in conto nei calcoli successivi.

Tabella 3.6 Percentuali di plastica residua in funzione della massa del campione

M_{WP}	M_{WP_res}	P_{WP_res}
(g)	(g)	(%)
56.1	11.6	20.7
162.9	33.0	20.3

3.1.2.3 Massa volumica della plastica

La massa volumica della plastica è una caratteristica indagata mediante il metodo dei picnometri. La procedura è di fatto analoga a quella che si affronterà nel caso del calcolo della MMVT delle miscele e che verrà affrontata al paragrafo 3.2.3. Nella fattispecie è sempre necessario operare con il metodo della quartatura manuale per la ripartizione uniforme del materiale all'interno dei picnometri.

A questo punto sarà necessario misurare la massa del campione all'interno del picnometro e successivamente quella del picnometro, del campione e dell'acqua deaerata (vedi Figura 3.3) che si sarà versata all'interno del picnometro. In questo modo si può determinare la massa della sola acqua occupante il volume, nel picnometro, complementare a quello occupato dalle plastiche. Passando da questi valori, sottraendo dal volume del picnometro quello occupato dall'acqua, è possibile ottenere quello relativo alle plastiche. Infine, conoscendo la massa della plastica è finalmente possibile ottenere la massa volumica della plastica. Il tutto si può riassumere nella seguente formulazione:

$$\rho_{wp} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 - V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}}$$

dove:

- m_1 massa del picnometro comprensivo del tappo;
- m_2 massa del picnometro comprensivo del tappo e del materiale (plastiche in questo caso);
- m_3 massa del picnometro comprensivo del tappo, del materiale e dell'acqua;

- ρ_w densità dell'acqua (o del liquido in cui è stato immerso), dipendente dalla temperatura;
- V_p volume del picnometro, ottenuto a seguito di calibrazione dello stesso mediante la relazione:

$$V_p = \frac{m_0 - m_1}{\rho_w}$$

- m_0 massa del picnometro comprensivo del tappo riempito d'acqua.

La densità dell'acqua è relativa alla temperatura di quest'ultima e la si può determinare come di seguito:

$$\rho_w = 1.00025205 + \left(\frac{7.59 \cdot t - 5.32 \cdot t^2}{10^6} \right)$$

Dove t è la temperatura dell'acqua ($^{\circ}\text{C}$).



Figura 3.3 Deaerazione e quartatura delle plastiche MEG

Attraverso i calcoli appena esposti si è arrivati al seguente valore di massa volumica per le plastiche in oggetto:

Tabella 3.7 Massa volumica della plastica MEGPO

MEGPO®	
ρ_{wp} (Mg/m ³)	1.166

3.1.3 Bitume

Il bitume all'interno dei conglomerati svolge il ruolo di matrice legante, quindi, la sua funzione primaria è quella di rivestire gli aggregati lapidei con un film sottile e continuo e al tempo stesso svolgere un'azione lubrificante tra gli stessi promuovendo un riarrangiamento all'interno dello

scheletro litico, garantendo coesione strutturale della miscela. Essendo un materiale viscoelastico le sue proprietà dipendono strettamente dalla temperatura e dal tempo di applicazione del carico.

Nel caso in esame si è utilizzato un bitume 70/100 di tipo “tal quale” fornito dal produttore e le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.8.

Tabella 3.8 Proprietà del bitume 70/100

Bitume 70/100	
Penetrazione a 25 °C (dmm)	96
Punto di rammollimento (°C)	49.3

3.1.4 Rejuvenator

Per quanto riguarda il rejuvenator si tratta di un reagente chimico-fisico capace di invertire i processi di invecchiamento del bitume contenuto nel materiale di recupero, il quale, a causa dell'esposizione prolungata agli agenti atmosferici e ai cicli termici, ha subito un processo di ossidazione e una perdita di frazioni oleose volatili. Si tratta di una miscela composta da oli nuovi e altre sostanze non nocive, normalmente impiegato in forma liquida con percentuali del 0.2% sul peso del RAP, la cui densità è pari a 0.875 Mg/m³.

3.2 Produzione delle miscele e confezionamento dei campioni di prova

Per adempiere agli obiettivi resi noti al paragrafo 2.1, è stata effettuata la produzione in laboratorio di differenti miscele, di cui si rimanda alla matrice sperimentale presentata in Tabella 2.1. Più in generale, nella valutazione degli effetti volumetrici e meccanici, le variabili di specificazione sono relative a:

- *Composizione*: in termini di percentuale di plastiche e di bitume di apporto, presenza di additivo chimico funzionale e scheletro litico impiegato;
- *Produzione*: in termini di temperature di miscelazione e di compattazione.

Sulla base di quanto sopra menzionato, la denominazione dei campioni prodotti nell'ambito del progetto Green Roads segue la codifica seguente:

$$sm.P_X.XX - C - t - N$$

Dove:

- *s* indica lo strato strutturale in esame (U – usura, B – base, C – collegamento);
- *m* individua il tipo di miscelazione (I – impianto, M – manuale);
- *P* indica la percentuale di plastiche di apporto sul peso della miscela (0, 0.4, 0.8);
- *X.XX* percentuale di bitume vergine sul peso degli aggregati e RAP;
- *C* scheletro litico impiegato;
- *t* protocollo termico definito sulla base della combinazione delle temperature di miscelazione e di compattazione (A: 165°C-145°C, B: 175°C-165°C);
- *N* lotto di produzione;
- *n* Numero del provino.

Nel caso in esame, si fa riferimento unicamente allo strato di collegamento e alla miscelazione manuale, fatta eccezione per quella della miscela di riferimento fornita dal produttore che si è svolta in impianto. La produzione è avvenuta considerando il protocollo termico A, in quanto più conforme con le richieste dei CAM. Dalla combinazione delle variabili fin qui esposte sono state eseguite le miscele riportate nella Tabella 3.9.

Tabella 3.9 Tabella riassuntiva delle miscele realizzate

ID	Descrizione	Data	STRATO	MISCELAZIONE
CI.0_3.77-0-A-1	TOUT - VENANT +30% (25???) GRANULATO 0/22 no rej	22/01/2025	collegamento	impianto
CM.0_3.77-1-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 1	22/09/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.77-1-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, 0.8% WP, scheletro litico 1	25/09/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.37-1-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, 0.8% WP, scheletro litico 1	25/09/2025	collegamento	manuale
CM.0_3.77-2-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, miscelazione 175°C e scheletro litico 2	07/10/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.77-2-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix, miscelazione 175°C e scheletro litico 2	07/10/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.37-2-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix, miscelazione 175°C e scheletro litico 2	07/10/2025	collegamento	manuale
CM.4_3.57-2-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, 0.8% WP MEG su mix, miscelazione 175°C e scheletro litico 2	05/11/2025	collegamento	manuale
CM.4_3.57-1-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, 0.4% WP, scheletro litico 1	13/11/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.37-1-A-2	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 1. Per confronto dati.	13/11/2025	collegamento	manuale
CM.4_3.57-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)	21/11/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.37-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)	21/11/2025	collegamento	manuale
CM.8_3.57-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)	22/01/2026	collegamento	manuale
CM.8_3.77-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)	22/01/2026	collegamento	manuale
CM.0_3.77-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)	23/01/2026	collegamento	manuale
CM.0_3.37-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)	23/01/2026	collegamento	manuale
CM.4_3.77-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 e 0.4% WP su mix	29/01/2026	collegamento	manuale
CM.4_3.37-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 e 0.4% WP su mix	29/01/2026	collegamento	manuale
CM.0_2.87-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3	30/01/2026	collegamento	manuale
CM.0_3.57-3-A-1	COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3. Verifica trend ipotizzato.	24/02/2026	collegamento	manuale

3.2.1 Determinazione della curva granulometrica

La curva granulometrica di progetto è un elemento fondamentale per il confezionamento della miscela bituminosa. Sulla base di questa si stabiliscono i dosaggi delle varie frazioni granulometriche. Da studi precedentemente svolti, sono state individuate tre distribuzioni granulometriche differenti per percentuali delle frazioni granulometriche. I dati sono riportati in Tabella 3.12.

Tabella 3.10 Percentuali delle frazioni granulometriche per i diversi scheletri litici

	<i>filler</i>	Sabbia 0/5	Graniglia 3/8	Pietrischetto 5/17	Pietrisco 15/25	Fresato 0/6	Fresato 0/20
1	2.0	30.0	0	21.0	22.0	0	25.0
2	2.4	35.0	0	18.6	19.0	0	25.0
3	2.0	35.0	0	16.0	22.0	0	25.0

Le percentuali delle varie frazioni granulometriche sono riferite al peso totale degli aggregati. La miscela bituminosa, tuttavia, risulta essere composta anche dalla fase legante e quindi è possibile riferire le percentuali target anche alla massa totale della miscela, le quali ovviamente varieranno in funzione della percentuale di bitume di apporto, della percentuale di plastica di aggiunta e della percentuale di agente rejuvenator. In questo modo si possono valutare le quantità di una certa frazione granulometrica sulla base di un predeterminato quantitativo di miscela che si vuole produrre.

In fase di post analisi emerge che le miscele realizzate con una stessa distribuzione dei dosaggi delle varie frazioni risultano molto simili in termini di curva granulometrica, il che, oltre che certificare il fatto che le varie fasi di sperimentazione sono state svolte correttamente, permette anche di raggruppare le miscele sulla base di un comune scheletro litico ma questo verrà affrontato in maniera più approfondita nel paragrafo 4.1.

3.2.2 Fase di produzione della miscela

La fase di miscelazione è stata eseguita seguendo una procedura che sfrutta lo shock termico causato dal contatto tra aggregato e fresato in modo da raggiungere la temperatura di equilibrio desiderata. L'inserimento dell'agente rejuvenator è stato eseguito durante la preparazione del granulato di recupero, prima dell'incorporazione di quest'ultimo nella miscela. Infatti, dalla letteratura scientifica, non emergono differenze significative nelle proprietà della miscela finale a seconda che l'additivo sia premiscelato con bitume vergine o spruzzato direttamente sul conglomerato (Zaumanis et. al. 2020).

Il processo di miscelazione, sebbene condotto ordinariamente presso impianti industriali specializzati, è stato riprodotto in scala di laboratorio adottando una procedura manuale. Tale scelta è stata dettata dalla necessità di operare su ridotti quantitativi di materiale in virtù della limitata disponibilità di materie prime e in maniera coerente con le finalità sperimentali della ricerca. Sebbene la produzione manuale sia intrinsecamente fonte di variabilità per via dell'effetto scala e dell'operatore coinvolto, garantisce rigore nel controllo dei dosaggi e nell'adeguatezza del grado di omogeneità del conglomerato.

Nello specifico, per ogni miscela analizzata, sono stati prodotti 6 kg di materiale, destinati al confezionamento di tre provini cilindrici compattati mediante pressa a taglio giratorio (PTG). Una quota parte della miscela è stata mantenuta in stato disaggregato per consentire le successive prove di caratterizzazione fisica dettagliate nei paragrafi successivi.

3.2.2.1 Fase di miscelazione

Sulla base delle premesse metodologiche esposte, è stato definito un protocollo di miscelazione rigoroso, finalizzato a massimizzare l'interazione tra i componenti e a replicare su scala ridotta ciò che avviene normalmente in impianto. La procedura si articola nelle seguenti fasi:

- inserimento degli aggregati preriscaldati per almeno 2 ore a 230 °C, miscelazione di 30 secondi;
- incorporamento delle plastiche preriscaldate, miscelazione di 120 secondi;
- aggiunta RAP + rejuvenator e miscelazione fino al raggiungimento della temperatura di equilibrio, coincidente con quella di miscelazione;
- aggiunta di 1/3 del bitume, miscelazione di 30 secondi;
- aggiunta 1/2 del filler, miscelazione di 30 secondi;
- aggiunta 1/3 del bitume, miscelazione di 30 secondi;
- aggiunta 1/2 del filler, miscelazione di 30 secondi;
- aggiunta 1/3 del bitume, miscelazione di 30 secondi;
- miscelazione più rapida per 60 secondi;
- riposo della miscela per 60 secondi;
- miscelazione a velocità standard per 60 secondi per simulare l'azione dei rulli compattatori.

Le temperature di preriscaldamento a cui sono stati sottoposti i materiali sono finalizzate al raggiungimento dello stato PCA (Polymer Coated Aggregate) sfruttando, come detto precedentemente, lo shock termico. Le varie temperature sono indicate nella Tabella 3.11.

Tabella 3.11 Temperature di preriscaldamento

Temperature dei materiali	
T_{aggregati} [°C]	230
T_{RAP_&_WP} [°C]	65
T_{bitume} [°C]	165

3.2.2.2 Fase di compattazione

In seguito alla produzione del conglomerato, per poter confezionare il provino cilindrico, si è proceduto attraverso la fase di compattazione mediante pressa a taglio giratoria (PTG), in conformità con la norma EN 12697-31. Il principio di funzionamento si basa sull'azione simultanea di una compressione assiale statica e di uno sforzo di taglio indotto da un movimento dell'asse del campione, che genera una superficie conica di rivoluzione (Figura 3.4).

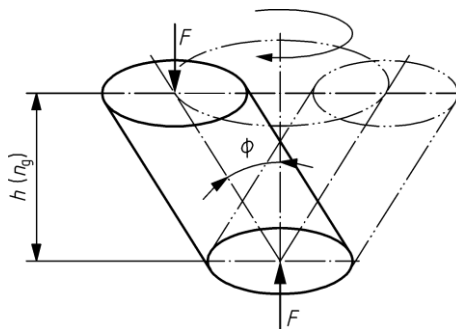


Figura 3.4 Schema di compattazione

La procedura operativa della compattazione parte dall'inserimento di una certa massa di materiale nelle fustelle adeguatamente preriscaldate al fine di evitare dispersioni termiche. La norma distingue il calcolo della massa in base al fatto che i provini vengano impiegati per i test meccanici o per la determinazione del contenuto di vuoti. Nel caso in esame la procedura da adottare è la seconda: la massa deve essere tale da garantire che, alla fine della compattazione, il provino abbia un'altezza compresa tra determinati limiti (solitamente tra 50 mm e 100 mm per stampi da 100 mm, o tra 100 mm e 150 mm per stampi da 150 mm). La massa della miscela (M) da introdurre nello stampo è calcolata per ottenere un'altezza minima del provino (h_{min}) corrispondente allo stato teorico di "zero vuoti":

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

dove:

- M , Massa della miscela (g);
- D , Diametro interno della fustella (mm);
- h_{min} altezza minima teorica del provino (corrispondente a 0% di vuoti) (mm);
- ρ_m densità massima della miscela (MMVT) (Mg/m^3).

Durante la prova devono essere impiegati degli inserti metallici circolari (anch'essi portati alla temperatura di compattazione) in modo da distribuire correttamente il carico.



Figura 3.5 Fustella e inserti metallici circolari

I parametri di settaggio della macchina sono stati impostati come segue:

- Pressione verticale: 600 *kPa*;
- Angolo effettivo interno: è l'angolo di inclinazione del carico, per il quale la norma impone che sia $0.82 \pm 0.02^\circ$;
- Velocità di rotazione: la velocità standard internazionale è posta a 30 rotazioni al minuto.

Oltre a queste impostazioni bisogna specificare che il provino può essere compattato ponendo come parametro fisso il numero di giri o l'altezza del provino. Come specificato dal capitolato ANAS i provini per lo strato di collegamento devono essere compattati per un numero di rotazioni pari a 180.



Figura 3.6 Pressa a taglio giratoria

Al termine della prova è possibile determinare l'altezza dei provini manualmente servendosi del calibro e misurando quattro altezze, in quattro punti individuati secondo una croce ad assi ortogonali.

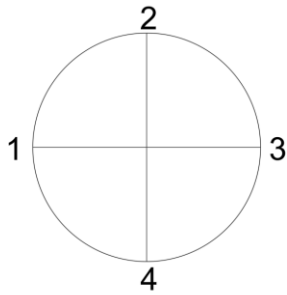


Figura 3.7 Punti di misura delle altezze



Figura 3.8 Misurazione delle altezze



La pressa a taglio giratoria permette la registrazione dell'altezza per ogni rotazione. In questo modo si possono costruire le curve di compattazione su scala semi-logaritmica (vedi Grafico 3.3), sulla base delle quali si possono poi calcolare le percentuali dei vuoti ai diversi gradi di compattazione (10, 100 e 180 rotazioni per lo strato di collegamento). Le curve mostrano l'andamento del grado di compattazione rispetto al numero di giri (C_x). Il grado di compattazione non è altro che il complemento a 100 della percentuale dei vuoti. La sua procedura di calcolo avviene per diversi step:

1. Grado di compattazione apparente (C_{ux}) ovvero senza considerare l'effetto parete:

$$C_{ux} = \frac{\left(\frac{M_{air}}{V_x}\right)}{\rho_m}$$

2. Correzione per effetto parete (c), necessaria per compensare la non perfetta aderenza del materiale allo stampo:

$$c = \frac{\rho_{SSD}}{\frac{M_{air}}{V_{180}}}$$

3. Grado di compattazione finale (C_x):

$$C_x = C_{ux} \cdot c$$

La curva di compattazione è descritta dalla seguente equazione:

$$C_x(n_G) = C_1 + k \cdot \log(n_G)$$

Dove:

- n_G è il numero di giri;
- C_1 è l'auto-addensamento (valore dell'intercetta) ovvero il grado di compattazione relativo al primo giro;
- k è la pendenza della curva.

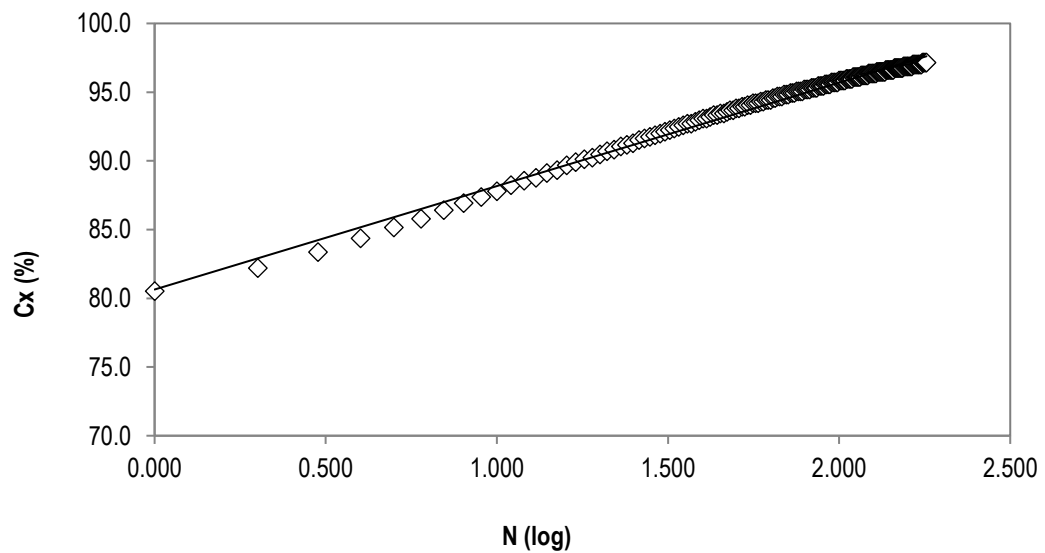


Grafico 3.3 Curva di compattazione semi-logaritmica

Al termine della prova di compattazione si avranno i provini confezionati, come riportato nella figura seguente.



Figura 3.9 Provini compattati

3.2.3 Determinazione della massima massa volumica teorica

La massima massa volumica teorica (MMVT) corrisponde alla massa per unità di volume della miscela priva di vuoti d'aria. Nella norma EN 12697-5 vengono proposti diversi metodi per il calcolo di quest'ultimo tra cui alcune teoriche e altre sperimentali (che forniscono il valore effettivo).

Tale parametro risulta essere fondamentale sia per il calcolo della percentuale di vuoti che per il calcolo della massa da inserire in fustella. Evidentemente il calcolo sperimentale della MMVT può avvenire solo in seguito alla fase di miscelazione; pertanto, per il calcolo della massa da inserire in fustella si è sfruttata la procedura teorica anche nota come procedura matematica. Questo metodo si basa sulla conoscenza della composizione della miscela e delle densità dei singoli componenti, attraverso la seguente relazione:

$$\rho_{mat} = \frac{100}{\frac{P_a}{\rho_a} + \frac{P_b}{\rho_b} + \frac{P_{ad}}{\rho_{ad}}}$$

Dove:

- P_a percentuale in massa degli aggregati (%);
- P_b percentuale in massa del legante (%);
- P_{ad} percentuale in massa degli additivi (%);
- ρ_a densità apparente delle singole frazioni di aggregato (Mg/m^3);
- ρ_b densità del legante (Mg/m^3);
- ρ_{ad} densità dell'additivo (Mg/m^3).

Una procedura più precisa è invece quella volumetrica, perseguita mediante l'utilizzo dei picnometri. Tale metodo prevede l'inserimento del campione di miscela, precedentemente sgranata, all'interno di un picnometro. Per verificare la riproducibilità della prova occorre smistare il campione su due picnometri attraverso il metodo di ripartizione esposto al sottoparagrafo 3.2.3.1 che fa capo alla norma EN 12697-28.

Il picnometro contenente metà del campione viene pesato compreso del tappo e quindi viene riempito con acqua distillata. Successivamente si applica il vuoto tramite apposito macchinario (per circa 30 min), ricercando una pressione residua minore di 4 kPa. Si pesa quindi il picnometro riempito di acqua distillata deaerata e della miscela sgranata, facendo attenzione a formare un menisco in corrispondenza del tappo del picnometro. Infine, risulta necessario conoscere la massa del picnometro pieno di acqua distillata deaerata.



Figura 3.10 Misurazione della MMVT

Si può quindi procedere con il calcolo della massima densità volumica teorica:

$$\rho_m = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \cdot V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}$$

Dove:

- m_1 è la massa del picnometro vuoto comprensivo del tappo (g);
- m_2 è la massa del picnometro riempito della miscela sgranata (g);
- m_3 è la massa del picnometro riempito della miscela sgranata e di acqua distillata deaerata (g);
- V_p è il volume del picnometro (m^3);
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova (Mg/m^3).

La metodologia di calcolo della densità dell'acqua viene specificata nella stessa normativa come di seguito:

$$\rho_w = 1.00025205 + \left(\frac{7.59 \cdot t - 5.32 \cdot t^2}{10^6} \right)$$

Dove t è la temperatura dell'acqua ($^{\circ}C$).

Per quanto riguarda il volume del picnometro, questo viene invece determinato a valle della calibrazione del contenitore:

$$V_p = \frac{m_0 - m_1}{\rho_w}$$

Dove con m_0 si indica la massa del picnometro riempito d'acqua comprensivo del tappo (g).

3.2.3.1 Ripartizione del campione tramite quartatura

La ripartizione del campione è una procedura necessaria al fine di dividere il campione di prova in campioni più piccoli e rappresentativi, garantendo che la composizione (specialmente la distribuzione degli aggregati) rimanga invariata.

La procedura di quartatura, da normativa, si utilizza per ottenere un campione ridotto in modo tale che sia delle dimensioni richieste per la prova che si vuole performare. Tuttavia, in questo contesto è stato sfruttato per poter dividere il campione in altri più piccoli mantenendo comunque l'omogeneità.

La procedura è standardizzata tramite la EN 12697-28 e consiste nei seguenti passaggi:

- Per almeno tre volte si forma un cumulo di miscela di forma conica;
- Si appiattisce il cumulo in modo da dargli una forma circolare;
- Si divide il cumulo in quattro parti uguali mediante due linee perpendicolari passanti per il centro;
- Si combinano a coppie le parti opposte diagonalmente.

3.2.4 Determinazione della densità apparente e del volume dei vuoti

La determinazione della densità apparente, nel corso della campagna sperimentale è stata di fondamentale importanza in quanto, incrociando questo dato con la MMVT si può ottenere la percentuale dei vuoti dei provini prodotti.

Secondo la norma BS EN 12697-6, vi sono quattro metodologie principali per il calcolo di questa grandezza. Nel caso in esame si è prediletta la procedura satura superficie asciutta (SSD), che viene generalmente adoperata la maggior parte delle volte in cui viene utilizzata la pressa a taglio giratoria poiché tiene conto dell'acqua che entra nei pori superficiali.

Per questa prova è necessaria la disponibilità di una bilancia dotata di un cestello sospeso in un bagno d'acqua. La procedura consiste nel pesare il provino in condizioni asciutte, dopodiché lo stesso viene immerso in acqua per un tempo di almeno 30 min e successivamente viene pesato in immersione. Il valore rilevato sarà sicuramente minore del peso del provino pesato in aria, in quanto la bilancia permette di misurare il peso del volume d'acqua spostato dal provino, considerando quindi anche i pori superficiali in cui è penetrata l'acqua. Infine, il provino viene estratto dal bagno d'acqua e ripeso in aria a seguito della rimozione dell'acqua depositata

superficialmente non penetrata nei pori tramite l'impiego di un panno umido. Infine durante i 30 minuti di immersione, è buona norma scuotere leggermente il provino o il cestello all'inizio per favorire la fuoriuscita dell'aria intrappolata superficialmente.



Figura 3.11 Immersione in acqua dei provini per determinazione della densità apparente

Si può quindi procedere con il calcolo della densità apparente del provino:

$$\rho_{SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w$$

Dove:

- m_1 è la massa del provino pesato in aria (g);
- m_2 è la massa del provino pesato in acqua (g);
- m_3 è la massa del provino in condizioni sature a superficie asciutta, pesato quindi in aria (g);
- ρ_w è la densità dell'acqua alla temperatura di prova (Mg/m^3).

3.2.5 Determinazione della percentuale di bitume tramite prova di ignizione

Per determinare il contenuto di legante delle miscele bituminose si utilizza la prova di ignizione, la cui procedura è riportata nella BS EN 12697-39. La prova consiste nel riscaldamento del campione di miscela a una temperatura tale da provocare l'ignizione e la combustione del legante. La differenza tra la massa della miscela prima della prova e la massa dell'aggregato residuo dopo la combustione permette di determinare il contenuto di bitume.

I metodi di prova proposti si differenziano a seconda del fatto che il forno sia fornito o meno di una bilancia interna. Nel caso della ricerca in oggetto si aveva a disposizione un forno con bilancia interna, pertanto, la procedura adottata è stata quella descritta nel seguito.

Innanzitutto, il campione deve essere preparato secondo la norma EN 12697-28, che tratta la ripartizione del campione secondo il metodo della quartatura (vedi sottoparagrafo 3.2.3.1). Se il campione è umido, deve essere asciugato a massa costante o ne deve essere determinato il contenuto d'acqua; è stato quindi necessario mantenere il campione a una temperatura tale per cui l'acqua evaporasse per periodo di circa 12h.



Figura 3.12 Cestello per prova di ignizione con materiale all'interno

Il forno della prova di ignizione deve essere preriscaldato fino al raggiungimento di una temperatura compresa tra i 500 e i 540° C. A questo punto si pesa la tara del cestello di prova e dopodiché si pesa il cestello compreso del campione. La bilancia interna fa in modo che durante l'ignizione, il sistema registri la perdita di massa, in questo modo la prova termina automaticamente quando la variazione di massa scende sotto una soglia prestabilita (generalmente lo 0,01% per tre minuti consecutivi). Una volta estratto e raffreddato, si pesa l'aggregato residuo.

A questo punto il calcolo consiste nel determinare la percentuale di massa che è stata persa durante il processo di ignizione. Tale percentuale sarà appunto corrispondente alla percentuale di fase legante.

$$M_{mix} = M_{basket+mix} - M_{basket}$$

$$M_{agg} = M_{basket+agg} - M_{basket}$$

$$M_b = M_{mix} - M_{agg}$$

Dove:

- M_{mix} massa del campione di conglomerato;
- M_{basket} tara del cestello;
- $M_{basket+mix}$ lordo del cestello più il campione pre-ignizione;
- $M_{basket+agg}$ lordo del cestello più il campione post-ignizione;

- M_{agg} massa del campione al netto del legante;
- M_b massa della fase legante (volatilizzata tramite ignizione).

Si può quindi procedere con il calcolo della fase legante in percentuale, sul peso totale della miscela e sul peso degli aggregati.

$$EBP.M = \frac{M_b}{M_{mix}} \cdot 100$$

$$EBP.A = \frac{M_b}{M_{agg}} \cdot 100$$

Dove $EBP.M$ e $EBP.A$ sono rispettivamente la percentuale di fase legante totale effettiva calcolata sulla massa della miscela e la percentuale di fase legante totale effettiva calcolata sulla massa degli aggregati.

Considerando che, dall'analisi di caratterizzazione delle plastiche, come riportato al 3.1.2 è emerso che a seguito della prova di ignizione sulle stesse vi è un residuo del 21%, si può calcolare a quanto ammonta la percentuale di plastiche bruciate durante la prova:

$$BWP.M = WP.M \cdot 0.79$$

Dove:

- $BWP.M$ è la percentuale di plastica volatilizzata durante la prova (Burned Waste Plastic) calcolata sulla massa totale della miscela;
- $WP.M$ è la percentuale di plastiche calcolata sulla miscela totale.

Complementarmente si può anche valutare la percentuale di bitume bruciato durante il test ($BB.M$ – Burned Bitumen):

$$BB.M = B_{mix} - BWP.M$$

Indicando con B_{mix} la percentuale di fase legante totalmente bruciata durante la fase di ignizione.

3.2.6 Determinazione della curva granulometrica di estrazione

Uno degli aspetti da controllare per assicurarsi che tutte le fasi di confezionamento siano state svolte correttamente sta sicuramente nella determinazione della curva granulometrica di estrazione, tramite procedura di setacciatura.

Quello che ci si aspetta da questa prova è la convergenza tra curva di progetto e curva di estrazione post-ignizione. La convergenza delle suddette è indice del fatto che le procedure di miscelazione,

in termini di dosaggio dei materiali, di omogeneità di miscelazione e di ripartizione del conglomerato nei vari provini sono state svolte correttamente. L'obiettivo della prova, quindi, è dividere un campione di aggregato in diverse frazioni dimensionali per determinare la percentuale in massa di materiale che passa attraverso una serie di setacci con aperture progressivamente più piccole.

La procedura per poter eseguire la prova in oggetto è delineata dalla norma EN 933-1 e si articola generalmente in queste fasi:

- Lavaggio (opzionale ma consigliato): Il campione viene lavato su un setaccio da 0,063 mm per rimuovere accuratamente il limo e l'argilla (il "passante al lavaggio") che potrebbero aderire ai granuli più grossi;
- Essiccazione: Il materiale rimasto viene essiccato in forno a 110 °C fino a massa costante;
- Stacciatura: Il campione viene versato in una "colonna di setacci" disposti in ordine decrescente di apertura. La colonna viene agitata meccanicamente o manualmente;
- Pesata: Si pesa la quantità di materiale trattenuta su ogni singolo setaccio.

Per ogni è necessario calcolare: la massa trattenuta parziale, la percentuale trattenuta rispetto alla massa totale iniziale e la percentuale passante cumulativa, la quale costituisce il dato che viene usato per tracciare la "curva granulometrica" sul grafico semilogaritmico.

Si riportano di seguito setacci impiegati per la determinazione della curva granulometrica.

Apertura del setaccio (mm)
31.5
20
16
12.5
8
4
2
0.5
0.25
0.063

Tabella 3.12 Apertura dei setacci



Figura 3.13 Colonna di setacci

3.2.7 Determinazione del modulo di rigidezza

La rigidezza delle miscele bituminose è un parametro che descrive la capacità del materiale di distribuire i carichi dei veicoli e di resistere alle deformazioni elastiche. La sua determinazione viene effettuata seguendo le direttive proposte dalla EN 12697-26, nella quale viene definita tramite il modulo complesso E^* , che tiene conto sia della componente elastica che di quella viscosa del conglomerato. Essendo il conglomerato bituminoso un materiale visco-elastico, la sua rigidezza dipende fortemente da:

- Temperatura: più è alta, più il materiale è bassa rigidezza;
- Frequenza di carico: più è alta la velocità di carico, più il materiale risponde in modo rigido.

Tra i metodi di prova proposti dalla norma, quello adottato nel caso in esame è il CIT-CY (Indirect Tensile test on Cylindrical specimens) che permette di impiegare i provini precedentemente compattati.

Innanzitutto, è necessario che il provino sia sottoposto a un condizionamento termico, in una cella climatica, in modo che raggiunga la temperatura di prova (nel caso in esame 25°C). La norma richiede che la temperatura sia mantenuta con una tolleranza in eccesso o in difetto di 0.5°C per tutta la durata del test.

La prova viene condotta tramite l'ausilio della UTM - 30 (Universal Testing Machine) riportata in Figura 3.14 .



Figura 3.14 UTM – Universal Testing Machine

Dopodiché la configurazione della prova avviene posizionando il provino tra due barre di carico (load strips) che hanno una superficie concava per adattarsi alla curvatura del cilindro. Vengono poi montati dei trasduttori di spostamento (solitamente due, uno per lato) lungo il diametro orizzontale del provino per misurare la deformazione trasversale provocata dal carico verticale. Per poter ospitare tutti gli elementi appena descritti si dispone il campione in un castelletto (rappresentato in Figura 3.15).

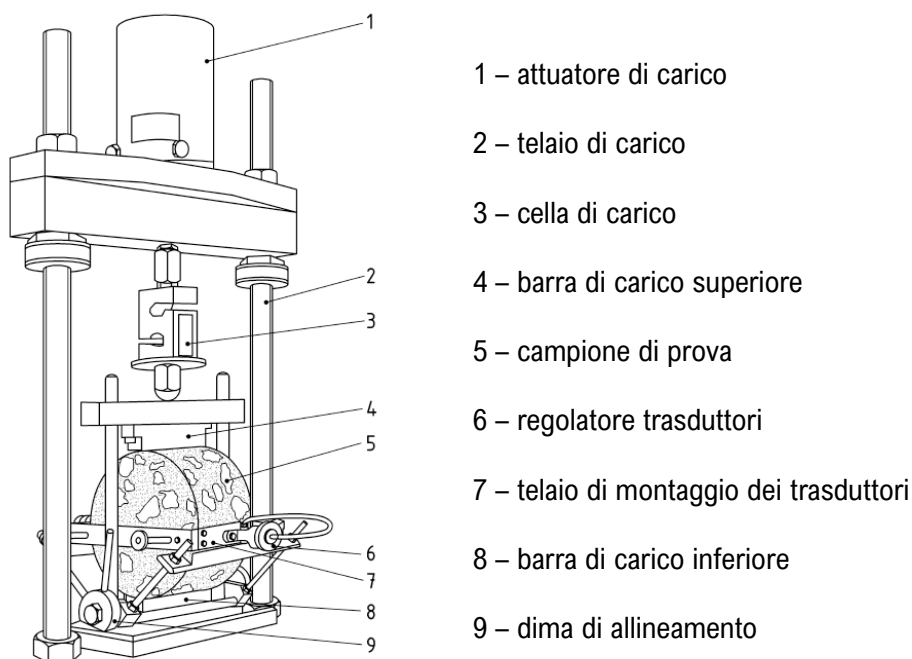


Figura 3.15 Configurazione del castelletto per la misura della rigidità

La prova consiste nell'applicazione di un impulso di carico sinusoidale verticale che genera uno stato di trazione indiretta lungo il diametro orizzontale. In una prima fase di stabilizzazione del sistema la macchina applica 10 impulsi di precarico (solitamente con un tempo di salita di 124 ms). Il carico deve essere tale da generare una deformazione orizzontale molto piccola (tipicamente compresa tra i 3 e i 10 micro-strain) per garantire che il materiale rimanga in campo elastico e non si danneggi. A questo punto si avvia la fase di carico, nella quale vengono applicati 5 impulsi di carico e i risultati vengono mediati. Per una maggiore precisione il provino viene ruotato di 90° e la prova viene ripetuta.

Il modulo di rigidità viene determinato infine direttamente dal macchinario servendosi della relazione:

$$E = \frac{F \cdot (\nu + 0.273)}{z \cdot h}$$

Dove:

- E modulo elastico;
- F forza di picco applicata;
- z ampiezza della deformazione orizzontale misurata;
- h altezza del provino;

- ν coefficiente di Poisson (assunto pari a 0.35 per le miscele bituminose).

3.2.8 Determinazione della resistenza a trazione indiretta

La resistenza a trazione indiretta (ITS) rappresenta il carico massimo sopportabile dalla miscela prima che questa si fessuri. Anche nel caso in esame si è impiegata la UTM, ma questa volta facendo capo alla norma EN 12697-23. La procedura prevede sempre il condizionamento, per almeno 4h, a 25°C all'interno di una cella di carico. Il provino viene posto in orizzontale tra le barre di carico, assicurandosi che sia perfettamente centrato (vedi Figura 3.16).

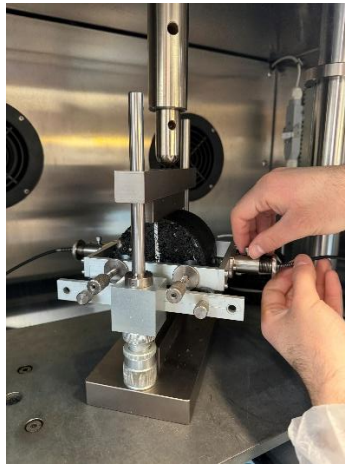


Figura 3.16 Configurazione di carico per la misura del modulo di rigidità

A questo punto la macchina applica una velocità di deformazione costante di 50 mm/min con una tolleranza di 2 mm/min. Il carico aumenta progressivamente fino a quando il provino non si frattura diametralmente e la macchina registra la forza massima raggiunta nonché la deformazione verticale durante il carico, fornendo quindi un diagramma di carico del tipo rappresentato in Grafico 3.4.

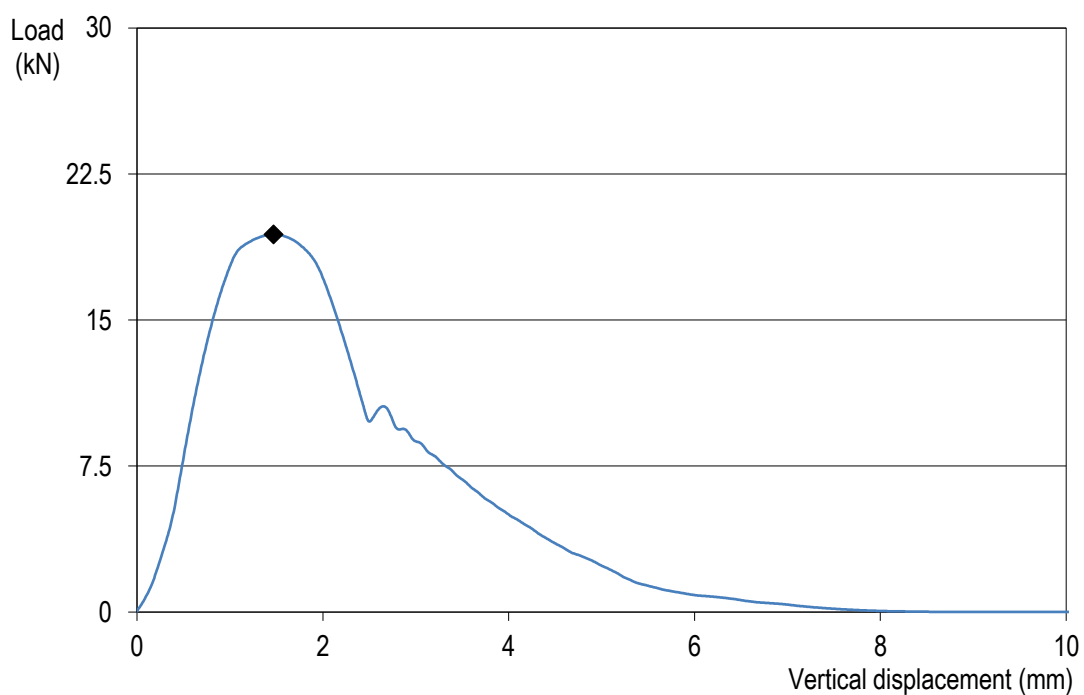


Grafico 3.4 Andamento del carico a rottura

Si può quindi procedere con il calcolo della resistenza a trazione indiretta (ITS), espressa in MPa, servendosi della relazione proposta in normativa:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H}$$

Dove:

- P è il carico massimo di rottura (N);
- D è il diametro del provino (mm);
- H è l'altezza del provino (mm);

4 Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono esposti e discussi i risultati della campagna sperimentale condotta presso il Laboratorio di Materiali Stradali. L'obiettivo primario dell'analisi è la valutazione critica dell'influenza delle variabili di progetto — in particolare il dosaggio di plastiche riciclate (WPM) e di bitume vergine di apporto (BA.A) — sulle prestazioni volumetriche e meccaniche delle miscele bituminose per strati di collegamento.

L'analisi si articola in tre fasi sequenziali:

- **Validazione dello scheletro litico:** un confronto tra le diverse distribuzioni granulometriche indagate per identificare la configurazione capace di garantire il miglior incastro meccanico e il rispetto dei limiti di Capitolato ANAS.
- **Caratterizzazione volumetrica:** l'esame della percentuale dei vuoti (a diversi livelli di compattazione), della VMA e della VFB, volto a verificare l'ipotesi di sostituzione parziale del legante vergine con il polimero recuperato.
- **Valutazione prestazionale:** lo studio del modulo di rigidezza e della resistenza a trazione indiretta (ITS) per definire la capacità portante e la coesione strutturale delle miscele di progetto.

4.1 Confronto delle granulometrie

Come anticipato al paragrafo 3.2.1, la campagna sperimentale ha previsto l'indagine di tre differenti distribuzioni granulometriche e sulla base della caratterizzazione granulometrica, esposta al punto 3.1.1, sono state ricostruite le curve granulometriche teoriche per ciascuno dei tre scheletri litici. La validazione del processo di miscelazione è stata eseguita mediante il confronto tra le curve teoriche e quelle di estrazione riportato nel Grafico 4.1, dove la perfetta sovrapposizione conferma l'accuratezza delle operazioni di laboratorio e il rigoroso controllo granulometrico mantenuto durante il confezionamento dei campioni.

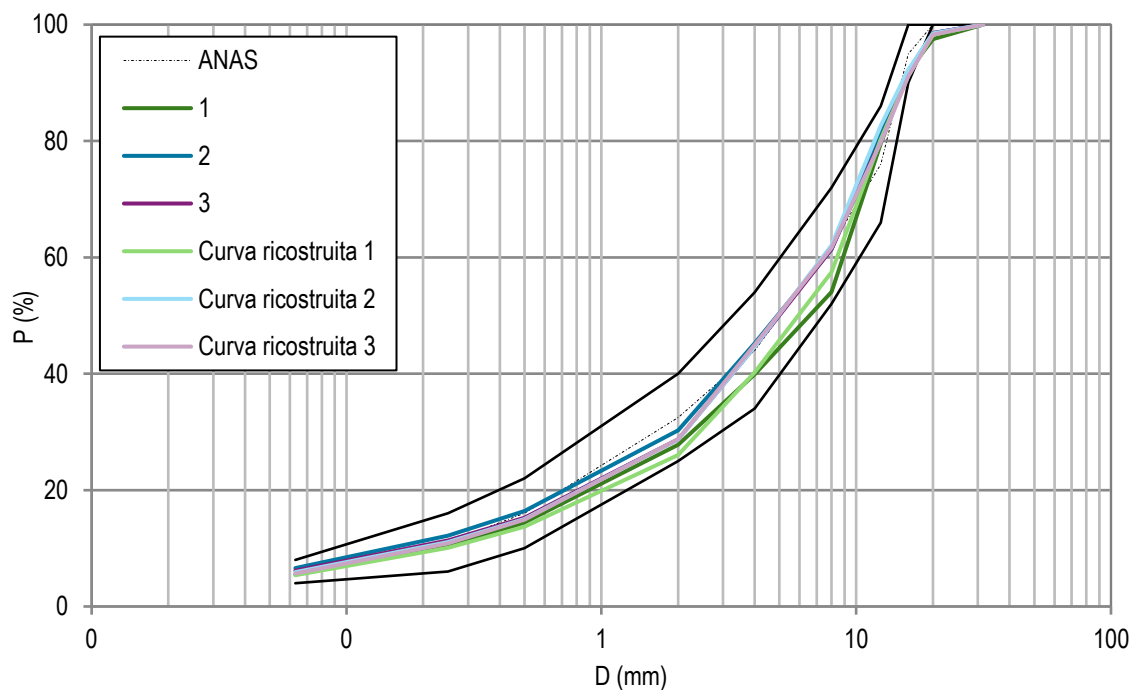


Grafico 4.1 Sovrapposizione delle curve teoriche e delle curve di estrazione medie

Tale coerenza è ulteriormente evidenziata nei Grafico 4.2 e Grafico 4.3, dove le curve di estrazione sono state raggruppate in base allo scheletro litico della miscela considerata, mostrando una dispersione estremamente ridotta.

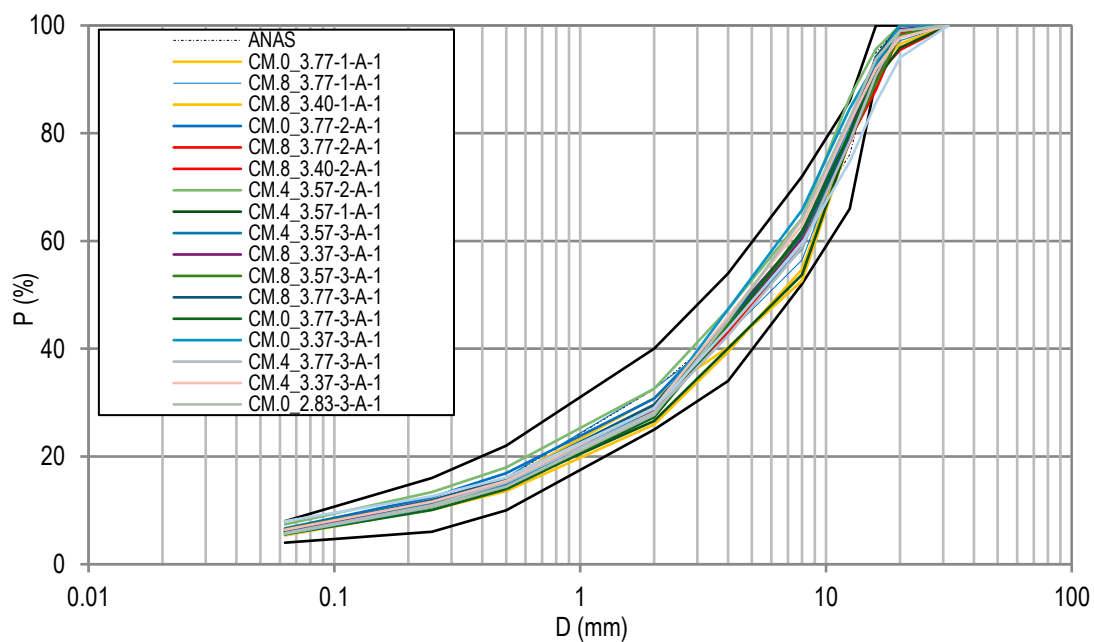


Grafico 4.2 Curve di estrazione delle miscele prodotte

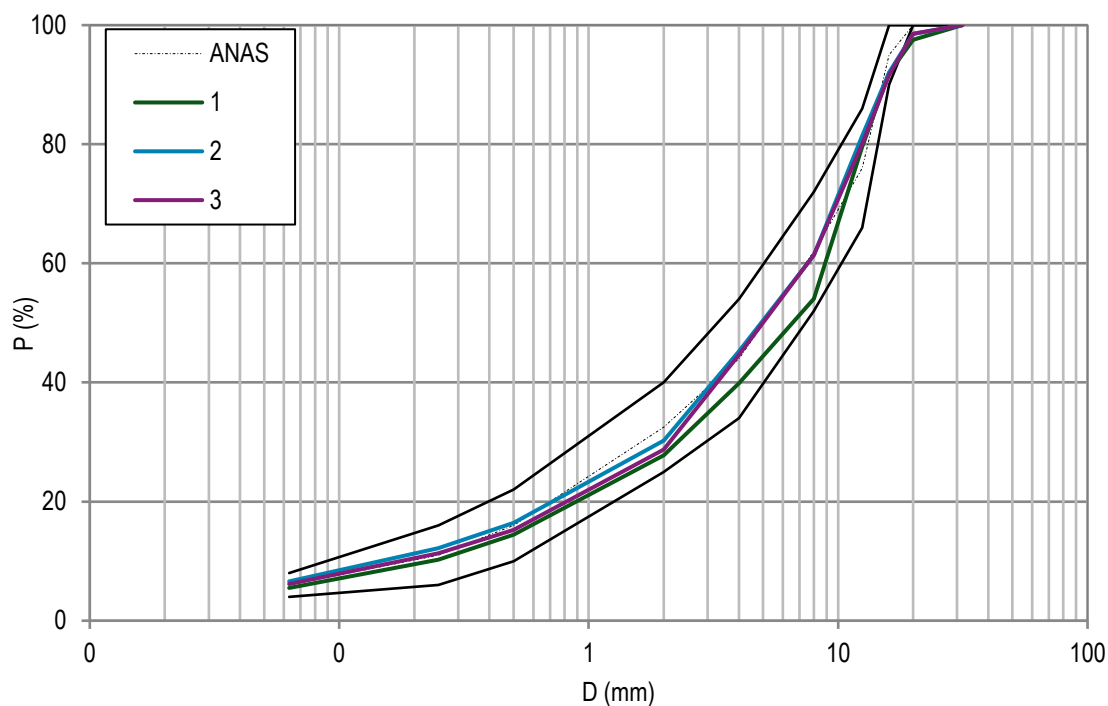


Grafico 4.3 Curve granulometriche medie delle miscele prodotte

I valori medi dei passanti per i tre scheletri litici indagati sono riportati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Passanti medi per ogni curva granulometrica

Apertura setaccio (mm)	Passanti medi		
	1	2	3
32	100.0	100.0	100.0
20.0	97.2	98.5	98.5
16.0	91.4	92.1	91.6
12.5	79.1	81.4	80.0
8.0	54.1	61.4	61.4
4.0	40.6	45.2	44.6
2.0	29.4	30.3	28.6
0.5	15.1	16.4	15.1
0.25	10.4	12.2	11.2
0.063	5.5	6.6	6.0

Dall'analisi comparativa delle curve emerge come lo scheletro litico 1 presenti lo scostamento più marcato rispetto al centro fuso definito dal Capitolato ANAS. Al contrario le distribuzioni 2 e 3 mostrano una convergenza superiore, con lo scheletro litico 2 che si posiziona come il più prossimo alla mezzeria del fuso normativo. Tuttavia, nonostante la vicinanza geometrica della distribuzione 2 al centro fuso, le prime risultanze sperimentali individuano nello scheletro litico 3 la risposta volumetrica più performante. Come evidenziato nel Grafico 4.4, la percentuale dei vuoti

al 100 rotazioni (numero di giri di progetto) per la distribuzione 3 risulta essere più prossima al target prestazionale fissato.

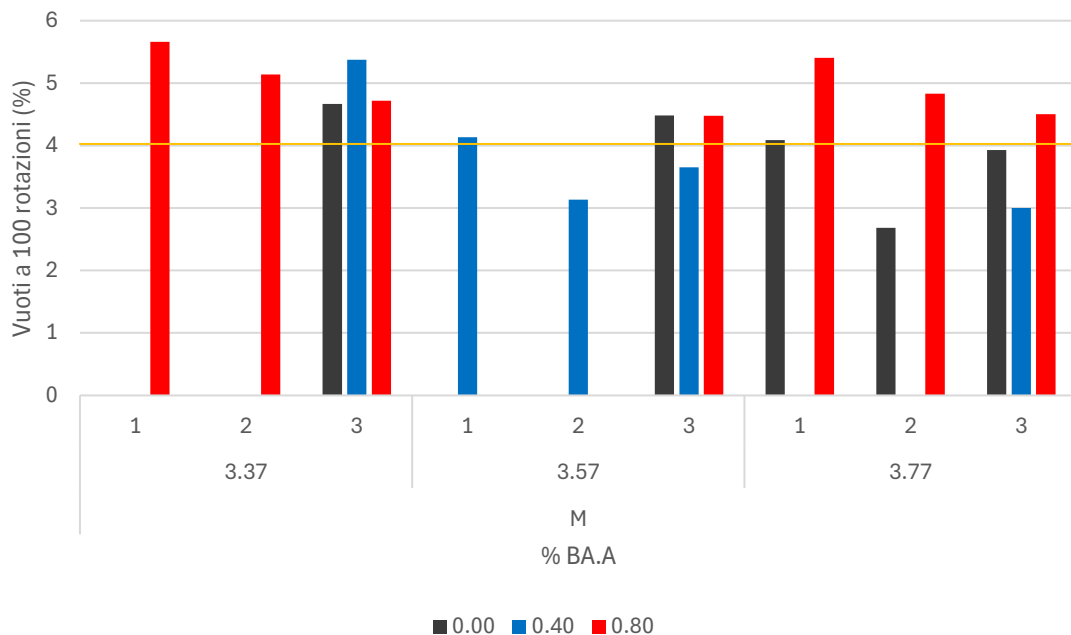


Grafico 4.4 Valori medi dei vuoti a 100 rotazioni per i tre scheletri litici

Il confronto tra i diversi scheletri litici evidenzia come il numero 3 garantisca un assetto dell'impacchettamento degli aggregati superiore rispetto alla distribuzione numero 2. Questo è dovuto al fatto che nella curva 3 si ha un incremento della frazione grossolana (15/25) a discapito di quella intermedia (5/15) da cui deriva un incastro meccanico più efficace. La frazione intermedia, infatti, nelle miscele può agire da "distanziatore" tra i granuli grossi impedendo loro di trovare la migliore configurazione in termini di punti di contatto e lasciando spazi che sabbia e filler non riescono a riempire in modo ottimale. L'eccesso quindi di questa frazione, dal punto di vista volumetrico, non risulta quindi essere benefico. Alla luce di tali considerazioni, lo scheletro litico 3 è stato selezionato come configurazione di riferimento per il proseguimento della sperimentazione e la produzione delle miscele. Proprio per tale ragione, nella matrice degli esperimenti sono state esplorate tutte le possibili combinazioni delle variabili di specificazione BW.M e BA.A.

Tabella 4.2 Valutazione degli errori tra la curva 1 e la curva 2

Apertura setaccio (mm)	Deviazione standard (σ)			ε_{2-1}	$\varepsilon_{2-1} < \sigma_1$	$\varepsilon_{2-1} < 2\sigma_1$	ε_{1-2}	$\varepsilon_{1-2} < \sigma_2$	$\varepsilon_{1-2} < 2\sigma_2$
	1	2	3						
32	0.00	0.00	0.00	0.00	V	V	0.00	V	V
20.0	1.59	2.13	1.73	1.01	V	V	-1.01	V	V
16.0	2.01	3.41	2.61	0.13	V	V	-0.13	V	V
12.5	0.88	3.85	2.72	1.83	X	X	-1.83	V	V
8.0	1.64	2.06	2.29	7.33	X	X	-7.33	X	X
4.0	2.13	1.78	1.35	5.35	X	X	-5.35	X	X
2.0	3.90	1.84	0.77	2.48	V	V	-2.48	X	V
0.5	1.51	1.32	0.69	1.96	X	V	-1.96	X	V
0.25	0.53	0.96	0.75	1.93	X	X	-1.93	X	X
0.063	0.27	0.58	0.73	1.10	X	X	-1.10	X	V

Tabella 4.3 Valutazione degli errori tra la curva 1 e la curva 3

Apertura setaccio (mm)	Deviazione standard (σ)			ε_{3-1}	$\varepsilon_{3-1} < \sigma_1$	$\varepsilon_{3-1} < 2\sigma_1$	ε_{1-3}	$\varepsilon_{1-3} < \sigma_3$	$\varepsilon_{1-3} < 2\sigma_3$
	1	2	3						
32	0.00	0.00	0.00	0.00	V	V	0.00	V	V
20.0	1.59	2.13	1.73	1.02	V	V	-1.02	V	V
16.0	2.01	3.41	2.61	-0.29	V	V	0.29	V	V
12.5	0.88	3.85	2.72	0.50	V	V	-0.50	V	V
8.0	1.64	2.06	2.29	7.38	X	X	-7.38	X	X
4.0	2.13	1.78	1.35	4.78	X	X	-4.78	X	X
2.0	3.90	1.84	0.77	0.97	V	V	-0.97	X	V
0.5	1.51	1.32	0.69	0.78	V	V	-0.78	X	V
0.25	0.53	0.96	0.75	1.07	X	X	-1.07	X	V
0.063	0.27	0.58	0.73	0.66	X	X	-0.66	V	V

Tabella 4.4 Valutazione degli errori tra la curva 2 e la curva 3

Apertura setaccio (mm)	Deviazione standard (σ)			ε_{3-2}	$\varepsilon_{3-2} < \sigma_2$	$\varepsilon_{3-2} < 2\sigma_2$	ε_{2-3}	$\varepsilon_{2-3} < \sigma_3$	$\varepsilon_{2-3} < 2\sigma_3$
	1	2	3						
32	0.00	0.00	0.00	0.00	V	V	0.00	V	V
20.0	1.59	2.13	1.73	0.01	V	V	-0.01	V	V
16.0	2.01	3.41	2.61	-0.41	V	V	0.41	V	V
12.5	0.88	3.85	2.72	-1.33	V	V	1.33	V	V
8.0	1.64	2.06	2.29	0.05	V	V	-0.05	V	V
4.0	2.13	1.78	1.35	-0.57	V	V	0.57	V	V
2.0	3.90	1.84	0.77	-1.51	V	V	1.51	X	V
0.5	1.51	1.32	0.69	-1.18	V	V	1.18	X	V
0.25	0.53	0.96	0.75	-0.86	V	V	0.86	X	V
0.063	0.27	0.58	0.73	-0.44	V	V	0.44	V	V

Si possono calcolare gli errori tra le diverse curve medie in modo tale da valutare se questi rientrano all'interno della deviazione standard e se quindi i valori delle curve 1 e 2 possano essere integrati a quelli della 3. Per ogni passante a un determinato setaccio è stato quindi calcolato l'errore, nonché la deviazione standard (vedi da Tabella 4.2 a Tabella 4.4).

$$\varepsilon_{i-j} = P_i - P_j$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_{i,n} - P_i)^2}{N_i}}$$

Dove:

- i e j indicano la curva granulometrica alla quale si sta facendo riferimento;
- n indica la miscela;
- N_i indica il numero di miscele relative a una stessa curva granulometrica;
- ε_{i-j} errore assoluto tra due passanti di due curve medie;
- P_i passante medio per la distribuzione granulometrica i .
- $x_{i,n}$ passante per la curva n di estrazione relativa alla distribuzione granulometrica i .

Tutti i calcoli vengono ripetuti per tutte le aperture del setaccio da 31.5 mm a 0.063 mm.

Da quest'analisi emerge che risulta esserci una discreta somiglianza tra la curva 2 rispetto alla 3 e viceversa, tra la curva 3 rispetto alla 2. In questo senso si può concludere che i dati relativi alle miscele realizzate con la curva 2 possano eventualmente essere presi come integrativi per le miscele realizzate con lo scheletro litico n. 3.

4.2 Analisi volumetrica

L'analisi volumetrica consiste nel valutare diversi parametri esplorando una o più variabili di progetto. In questo caso si propone un'analisi di tipo diagrammale, focalizzando l'attenzione sul calcolo di:

- Percentuale dei vuoti (a 10, 100 e 180 rotazioni);
- VMA (Voids in Mineral Aggregate);
- VFB (Voids Filled with Binder).

4.2.1 Percentuale dei vuoti

La percentuale dei vuoti in una miscela bituminosa indica la percentuale dei vuoti effettivamente liberi al suo interno. Il contenuto di vuoti d'aria di un provino viene calcolato utilizzando la densità massima della miscela e la densità apparente del provino, mediante la seguente relazione:

$$v_a = \frac{\rho_m - \rho_{SSD}}{\rho_m} \cdot 100$$

dove:

- ρ_m massima massa volumica della miscela;
- ρ_{SSD} densità apparente del provino.

Si tratta pertanto di un valore relativo in modo specifico a un provino compattato a un certo numero di rotazioni. In questo caso i campioni, come già anticipato al paragrafo 3.2.2.2, sono stati compattati a 180 rotazioni; tuttavia, per verificare che vengano rispettati i requisiti di Capitolato è necessario conoscere i valori delle percentuali dei vuoti a 10 e a 100 rotazioni. In particolare, il valore dei vuoti a 100 rotazioni risulta anche essere il più rappresentativo delle condizioni nelle quali si troverà la pavimentazione stradale nel corso della sua vita e viene pertanto considerato come valore di progetto N_{design} .

Per una caratterizzazione completa del comportamento volumetrico del conglomerato, è necessario determinare il contenuto di vuoti ai diversi gradi di compattazione. La curva di compattazione, già descritta al paragrafo 3.2.2.2, permette di assolvere a tale scopo. Questa, infatti, fornisce il grado di compattazione C_x , come complemento a cento della percentuale dei vuoti v_x , da cui

$$v_x = 100 - C_x$$

dove il pedice x indica il livello di compattazione espresso in numero di rotazioni della pressa PTG.

L'analisi volumetrica si è focalizzata sulle miscele realizzate con scheletro litico 3, assunto come configurazione di progetto. Si riportando nel seguito i grafici (Grafico 4.5) che mostrano l'andamento della percentuale dei vuoti rispetto alla variazione di bitume di aggiunta su aggregati e RAP (%BA.A), utilizzando il quantitativo di rifiuto polimerico inglobato (%WPM) come variabile parametrica. Questo approccio permette di isolare l'influenza del polimero e, specularmente, l'effetto dell'apporto polimerico a parità di bitume di aggiunta.

Il primo parametro analizzato è la percentuale dei vuoti a 10 rotazioni, indice che simula l'energia di compattazione conferita dalla finitrice e dai primi passaggi del rullo in cantiere. Questo

dato fornisce indicazioni sulla lavorabilità e stabilità iniziale della miscela. Per le miscele con 0.4% W.P.M si osserva una marcata pendenza della curva al variare del bitume di apporto. Tale trend suggerisce che, in questo dosaggio, il polimero agisce in sinergia con il legante svolgendo un'azione lubrificante. La miscela mostrano quindi un'elevata sensibilità al contenuto di bitume, che ne governa la facilità di costipamento iniziale. Per quanto concerne invece le miscele prodotte con lo 0.8% W.P.M la tendenza si inverte, mostrando un andamento quasi costante dei vuoti indipendentemente dall'aggiunta di bitume. In questo caso, l'elevato contenuto di polimero sembra dominare la risposta volumetrica, portando alla formazione di una struttura più rigida già nelle prime fasi. L'effetto lubrificante del legante viene annullato dalla presenza massiva della plastica, che irrigidisce lo scheletro e riduce la sensibilità della miscela alle variazioni di B.A.A.

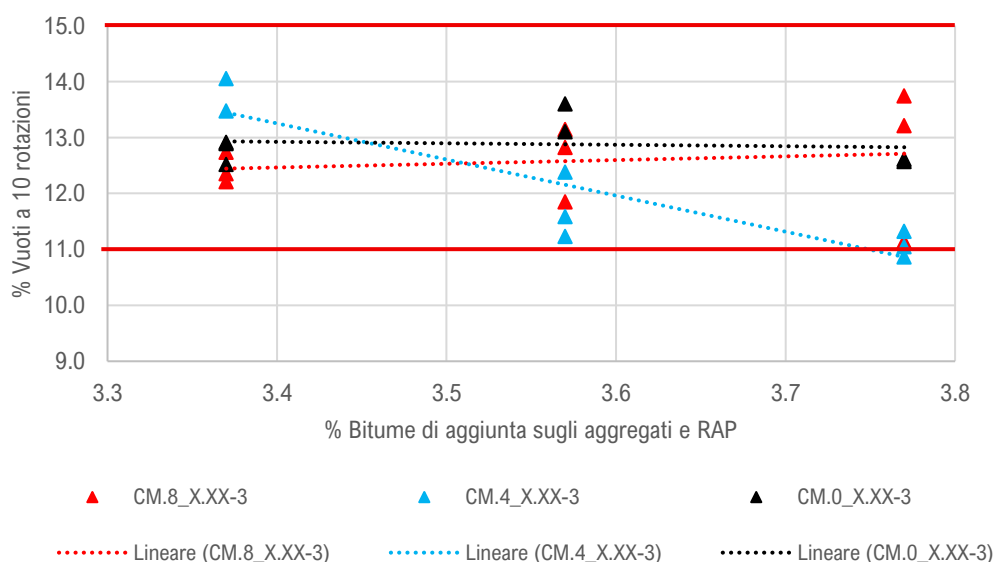


Grafico 4.5 Andamento della percentuale dei vuoti rispetto a % B.A.A. per le miscele compattate a 10 rotazioni

Il parametro volumetrico più significativo è rappresentato dalla percentuale dei vuoti al numero e giri di progetto, pari a 100. Sebbene i dati mostrino una certa variabilità intrinseca, assumendo come target di riferimento un contenuto dei vuoti pari al 4% è possibile trarre conclusioni rilevanti sull'ottimizzazione di legante.

Per la miscela di riferimento (0.0 % W.P.M), il contenuto ottimale di bitume di aggiunta si attesta al 3.77%. Tale evidenza conferma l'accuratezza delle ipotesi di dosaggio iniziali fornite del Produttore. Proseguendo l'analisi per la serie additivata con 0.4% W.P.M, si osserva che il target del 4% di vuoti viene raggiunto con una percentuale di bitume ridotta al 3.57%. Questo risultato convalida l'ipotesi teorica riscontrata da precedenti studi sullo strato di usura secondo cui

l'introduzione di materiale polimerico permette una riduzione del legante vergine pari al 50% del peso della plastica immessa. Diversamente, per il dosaggio allo 0.8% WPM, non si riscontra una correlazione lineare tra l'aumento del polimero e la riduzione del bitume: i dati mostrano un'elevata dispersione e una tendenza a manifestare un elevato volume dei vuoti per tutte le percentuali di bitume di apporto considerate, quasi a mostrare un comportamento tipico dell'aggiunta di aggregato minerale. In questa configurazione, il polimero sembra perdere la propria funzione di sostituto del legante per assumere un comportamento di tipo strutturante, agendo di fatto come aggregato minerale aggiuntivo che irrigidisce la matrice e ostacola il costipamento.

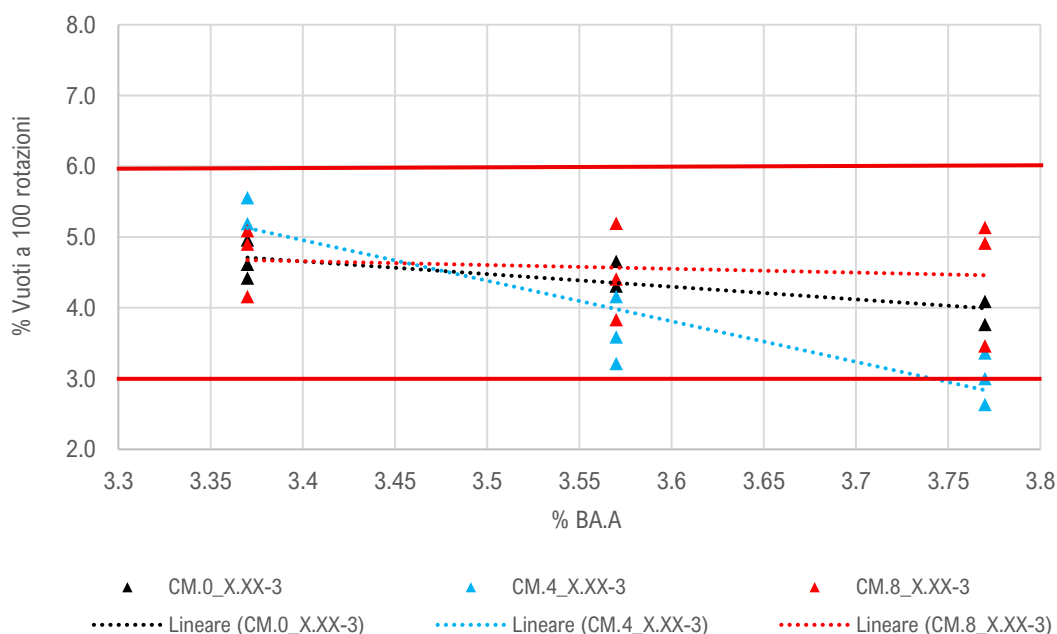


Grafico 4.6 Andamento della percentuale dei vuoti rispetto a %BA.A per le miscele compattate a 100 rotazioni

L'andamento dei vuoti a 180 rotazioni fornisce ulteriori indicazioni sulla stabilità della miscela sotto elevati sforzi di compattazione. Nel Grafico 4.7 si osserva che le miscele realizzate con lo 0.4% WPM mostrano una riduzione dei vuoti molto più marcata rispetto alla miscela non modificata, stabilizzandosi su valori critici compresi tra 1% e 1.5% per contenuti di bitume elevati. Sebbene ciò confermi l'efficace sinergia lubrificante tra polimero e bitume, a lungo termine ovvero ad alte rotazioni, questa drastica riduzione degli spazi liberi suggerisce una potenziale suscettibilità al fenomeno dell'ormaiamento.

L'aggiunta dello 0.8% di WPM produce invece un'elevata dispersione dei dati, il che rende la miscela instabile e non riproducibile con processi di miscelazione standard, portando a una

struttura volumetrica imprevedibile che non risponde linearmente all'aumento del tenore di legante.

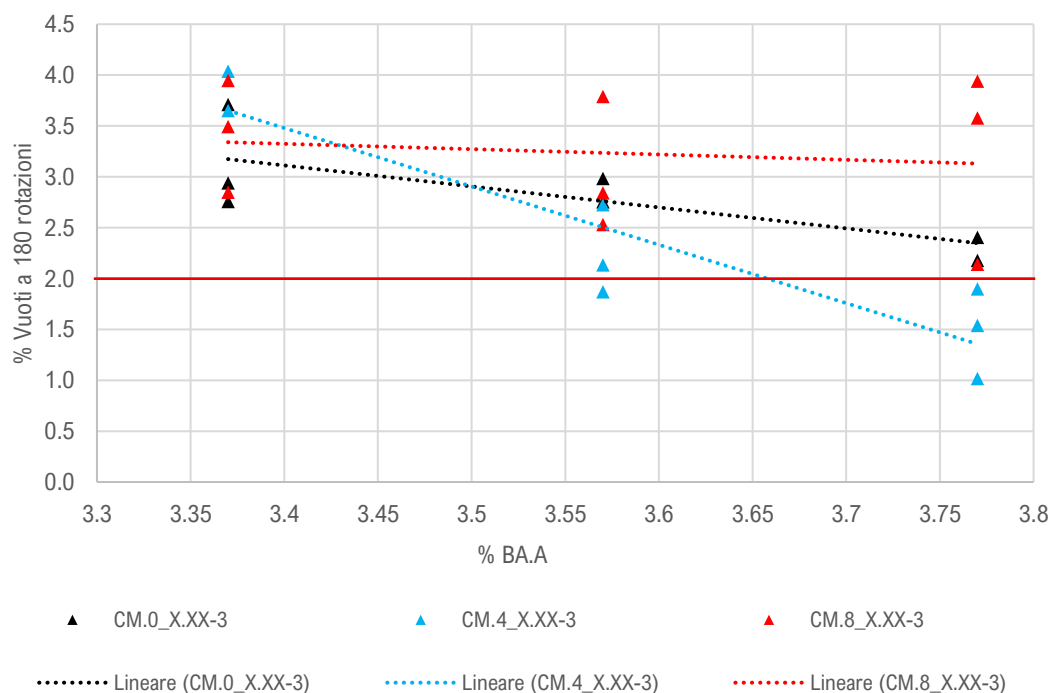


Grafico 4.7 Andamento della percentuale dei vuoti rispetto al % BA.A per le miscele compattate a 180 rotazioni

In conclusione, il confronto con i requisiti di Capitolato (paragrafo 2.2) evidenzia come la quasi totalità delle miscele rientri nei limiti normativi. L'unica eccezione è rappresentata dalla ricetta CM.4_3.77-3-A-1; in questo caso specifico, l'effetto lubrificante indotto dallo 0.4% di polimero, combinato con un dosaggio di bitume non ridotto, porta la miscela al di sotto della soglia minima dei vuoti.

La determinazione del volume dei vuoti richiede l'utilizzo della massima massa volumica, per la quale è stato impiegato il valore sperimentale, misurato con i metodi esposti al paragrafo 3.2.3. Per avere un'indicazione della precisione con la quale è stata effettuata la misura di quest'ultima, si possono mettere a confronto i dati teorici e sperimentali per tutte le miscele realizzate realizzando così delle carte di controllo (Grafico 4.8).

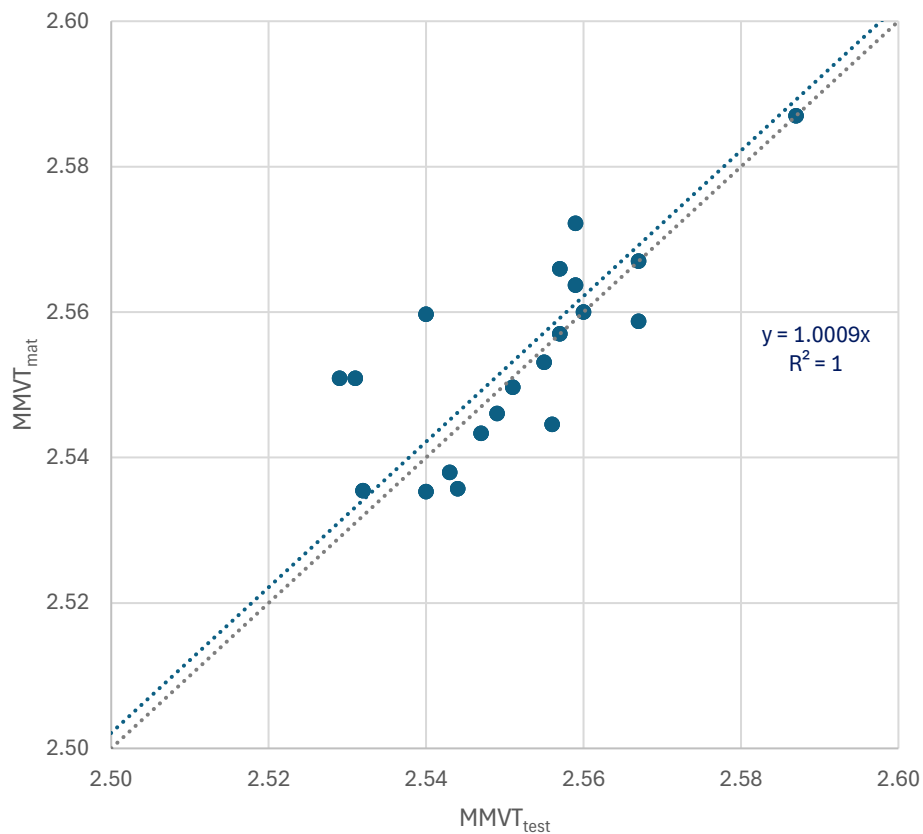


Grafico 4.8 Carta di controllo MMVT

4.2.2 VMA e VFB

Secondo la EN 12697-8, VMA rappresenta il volume dei vuoti intergranulari tra gli aggregati di una miscela bituminosa compattata. Questo volume include sia i vuoti d'aria, che il volume del legante bituminoso presente nel provino. In presenza di fasi aggiuntive, come nel caso della plastica, la Norma introduce il concetto di VMA_{ad} . Questo parametro viene calcolato come segue:

$$VMA_{ad} = v_a + \frac{B \cdot M \cdot \rho_b}{\rho_B} + \sum_i \frac{P_{ad,i} \cdot \rho_b}{\rho_{ad,i}}$$

Dove:

- v_a è la percentuale dei vuoti d'aria nel provino;
- $B \cdot M$ è la percentuale di bitume totale sulla massa totale della miscela;
- ρ_b è la densità apparente del provino (Mg/m^3);
- ρ_B è la densità del bitume (Mg/m^3);
- $P_{ad,i}$ è la percentuale di additivo sulla massa totale della miscela;

- $\rho_{ad,i}$ è la densità dell'additivo (Mg/m^3);

In particolare, il dato relativo alla percentuale di bitume totale sulla massa della miscela può essere definito sia su base teorica che sperimentale.

Nel primo caso viene calcolata con la seguente relazione

$$B.M = BA.M + BRA.M$$

Dove:

- $BA.M$, rappresenta la percentuale di bitume di aggiunta calcolata sulla massa totale della miscela;
- $BRA.M$, rappresenta la percentuale di bitume contenuta nel RAP introdotto nella miscela.

Nel secondo caso, si fa riferimento al dato ottenuto tramite prova di ignizione al netto della fase polimerica residua (come già espresso al punto 3.2.5).

$$B.M_{ign} = EBP - 0.21 \cdot WP.M$$

Nel paragrafo 3.2.5, è stato esposto come si sia misurata la percentuale di fase legante effettiva. In questa sede è però importante specificare come il suddetto valore sia simile al risultato teorico ($TBP.M$), calcolato in fase preliminare con la relazione:

$$TBP.M = B.M + WP.M \cdot 0.79 + REJ.M$$

Dove:

- $B.M$ è la percentuale di bitume calcolata sulla massa della miscela;
- $REJ.M$ è la percentuale di rejuvenator calcolata sulla massa della miscela.

Questa considerazione emerge confrontando i dati tramite l'utilizzo della carta di controllo, dalla quale si può apprezzare come il livello di precisione, nelle varie fasi di sperimentazione, sia soddisfacente.

Nel calcolo di $TBP.M$ si è tenuto conto del 21% di residuo plastico che permane a seguito della prova di ignizione, comportamento osservato durante la fase di caratterizzazione dei polimeri. Tale comportamento risulta essere verificato anche in questo caso.

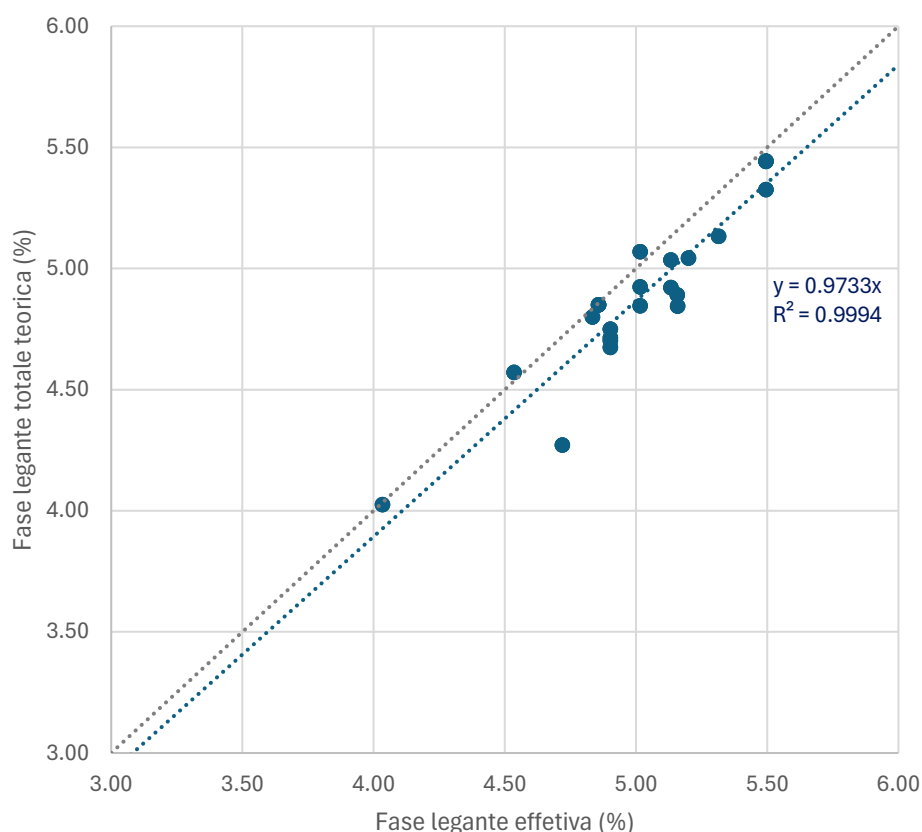


Grafico 4.9 Carta di controllo della fase legante

Il fatto che si verifichi questa somiglianza tra valori teorici e sperimentali implica che anche i valori di VMA calcolati con i due approcci non differiscano considerevolmente. Si è scelto di riportare i valori relativi al valore sperimentale del $B.M_{ign}$, in prima rappresentazione mediante un diagramma a istogramma (Grafico 4.10), il quale permette di riscontrare l'effetto dell'additivo a parità di contenuto di bitume e in seconda battuta tramite un grafico a dispersione che consente di individuare gli andamenti della VMA al crescere della percentuale di BA.A (Grafico 4.11).

È importante evidenziare che la variabile con la quale sono stati rappresentati gli andamenti della VMA non è la stessa utilizzata per il suo calcolo. Nel primo caso, infatti, si sta facendo riferimento al bitume di aggiunta sulla massa di aggregati (% BA.A), in quanto questa è la variabile di progetto investigata con diversi valori nel corso della campagna sperimentale; tuttavia, il calcolo è stato condotto considerando la fase legante nella massa della miscela (% BM.M).

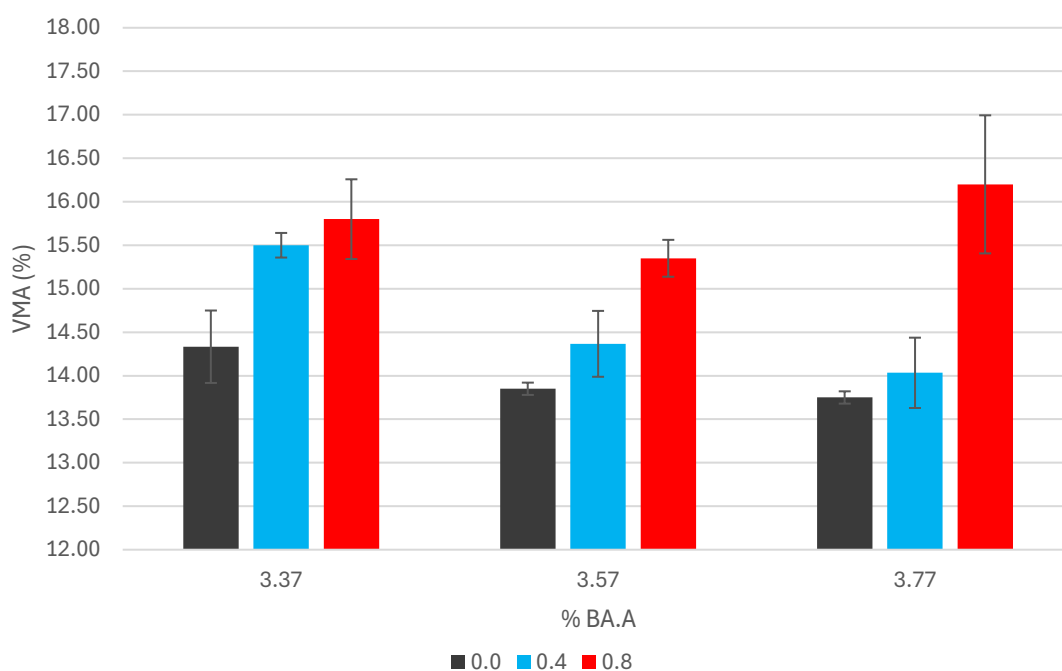


Grafico 4.10 Valori medi della VMA calcolata sulla base del dato sperimentale di % B.M (istogramma)

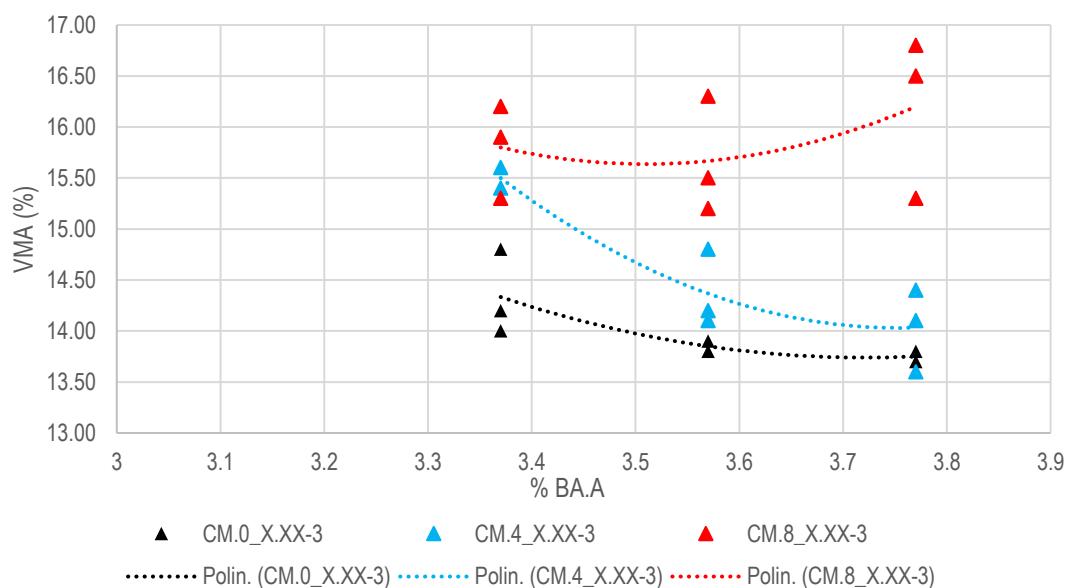


Grafico 4.11 Andamento della VMA calcolata sulla base del dato sperimentale di % B.M (grafico a dispersione)

La prima osservazione, estratta dal grafico a istogramma, riguarda l'aumento della VMA al crescere della percentuale di additivo polimerico. In realtà a parità di volume occupato da aggregati e vuoti, la sostituzione in massa di bitume con plastica dovrebbe condurre a una riduzione di volume in virtù della differente densità dei due materiali. Infatti, la densità delle plastiche impiegate risulta essere pari a 1.166 Mg/m³ contro quella del bitume che è pari a 1.025 Mg/m³. A parità di massa

la plastica occupa quindi un minor volume rispetto al bitume; questo significherebbe che, se la struttura degli aggregati rimane invariata, a parità di BA.A il VMA dovrebbe diminuire con l'aggiunta delle plastiche. Quello che si osserva invece è l'esatto contrario, questo è traducibile in una tendenza della plastica a formare uno scheletro solido che impedisce la chiusura dei vuoti intergranulari, agendo quindi con un effetto strutturante nei confronti della miscela. In particolare, la percentuale di vuoti risulta essere decisamente elevata in presenza dello 0.8% WP.M e l'andamento di VMA appare quasi traslato rispetto a quello delle miscele vergini. Per le miscele prodotte con lo 0.4% WP.M quello che invece si osserva è una diminuzione netta per alti quantitativi di bitume di aggiunta, avvicinandosi in maniera considerevole ai valori relativi allo 0.0% WP.M. Probabilmente questo comportamento è dovuto al fatto che aumentando il contenuto di bitume aumenta anche l'effetto lubrificante che questo esercita tra gli aggregati; pertanto, le plastiche riescono a interagire più efficacemente. Questo suggerisce che lo 0.4% WP.M sia il dosaggio che permette una buona sinergia tra il legante e l'aggregato.

Per quanto riguarda invece il calcolo di VFB, questo viene descritto dalla norma come un indicatore di quanta parte dello spazio disponibile tra gli aggregati (VMA) è stata effettivamente occupata dal bitume e dall'additivo. Facendo sempre riferimento a delle miscele comprendenti additivo, il calcolo del VFB può invece essere eseguito come di seguito:

$$VFB_{ad} = \left(\frac{B \cdot M \cdot \rho_b}{\rho_B} + \sum_i \frac{P_{ad,i} \cdot \rho_b}{\rho_{ad,i}} \right) \cdot \frac{100}{VMA_{ad}}$$

Dove tutti i fattori sono stati già descritti per il calcolo di VMA.

Come si può osservare VFB ha una stretta correlazione con VMA; pertanto, ne emerge che tale parametro si può calcolare considerando anche qui due differenti valori del contenuto di bitume sulla miscela: quello teorico e quello sperimentale. Anche in questo caso valgono le considerazioni fatte per la VMA, ovvero che i valori calcolati con le due percentuali di bitume risultano tra loro abbastanza simili in ragione del fatto che vi è poca discordanza tra valore teorico e sperimentale.

Logicamente quello che ci si aspetta è che, all'aumentare del bitume introdotto nella miscela, l'andamento di VFB sia sempre crescente ed è effettivamente quello che si riscontra dai dati ottenuti sperimentalmente (vedi Grafico 4.12 e Grafico 4.13).

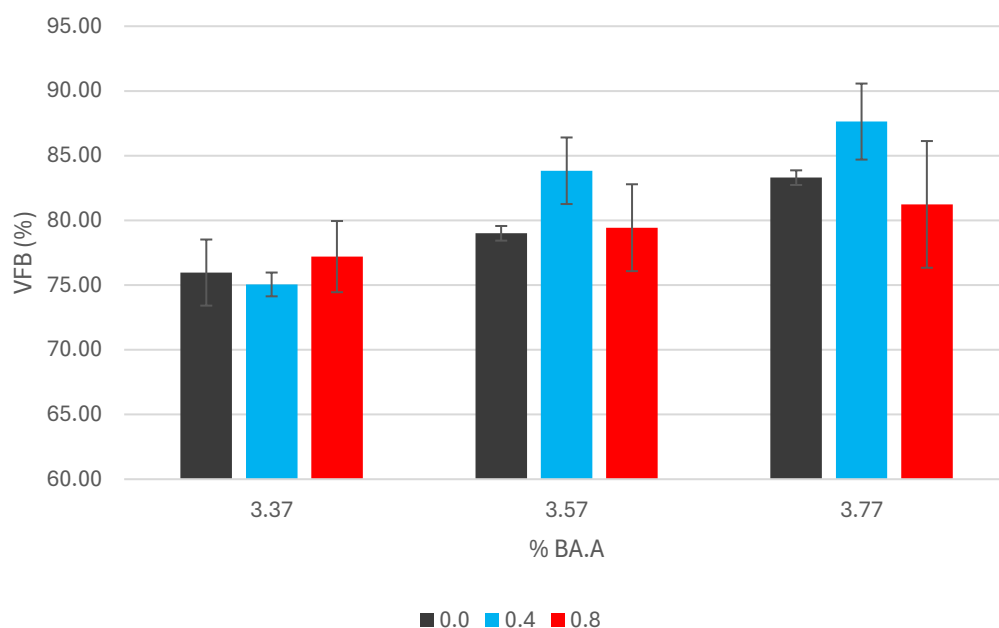


Grafico 4.12 Valori medi di VFB calcolati sulla base del dato sperimentale di %B.M (istogramma)

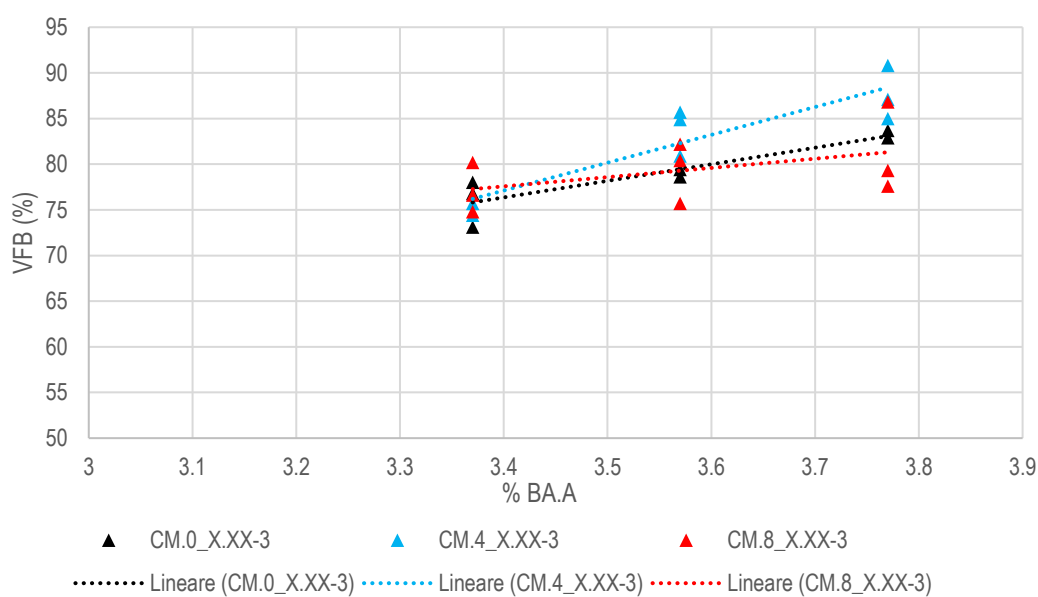


Grafico 4.13 Andamento della VFB calcolata sulla base del dato sperimentale di % B.M (grafico a dispersione)

Questi andamenti possono peraltro confermare alcuni comportamenti osservati dall'analisi della VMA, infatti, si nota come il bitume totale immesso nel conglomerato, per le miscele realizzate con lo 0.8% WP.M non aumenti in maniera significativa il volume di vuoti riempiti. Al contrario lo 0.4% porta ad una saturazione dei pori sempre più marcata avvalorando l'ipotesi legata all'effetto sinergico tra plastica e bitume.

4.3 Analisi delle prestazioni meccaniche

Mentre l'analisi volumetrica ha fornito una "fotografia" dell'architettura interna delle miscele oggetto di studio, l'analisi meccanica è un banco di prova per la valutazione della risposta strutturale del conglomerato sotto l'azione di carichi simulativi il traffico.

Da questo punto di vista, sono stati misurati il modulo di rigidezza, in modo tale da avere un'idea dell'attitudine dello strato di collegamento alla ripartizione delle sollecitazioni verso lo strati sottostanti; e il carico massimo sopportabile dal conglomerato, da cui è stato possibile determinare la resistenza a trazione indiretta, che fornisce invece indicazioni sul fatto che la miscela garantisca una sufficiente adesione tra gli aggregati.

4.3.1 Modulo di rigidezza

Come già esposto al paragrafo 3.2.7 il modulo di rigidezza è stato misurato servendosi del macchinario UTM (Universal Testing Machine). Questo parametro definisce la capacità di ripartire le sollecitazioni indotte dai carichi stradali agli strati sottostanti della sovrastruttura. Tecnicamente, esso esprime il rapporto tra la tensione applicata e la deformazione elastica risultante, fornendo un'indicazione diretta della resistenza del materiale alla deformazione sotto carichi dinamici.

La sua analisi risulta essere vantaggiosa in quanto permette di valutare come l'introduzione delle plastiche modifichi la risposta elastica della miscela quantificando il beneficio meccanico derivante dalla sostituzione parziale del bitume con il polimero. Attraverso il confronto tra le diverse percentuali di bitume di apporto (%BA.A), il modulo aiuta a individuare il punto di equilibrio in cui la miscela garantisce la massima portanza senza diventare eccessivamente fragile.

I risultati della prova sperimentale vengono riportati in forma di istogramma in modo da rendere più immediata la lettura, oltre ad evidenziare come il comportamento meccanico non sia necessariamente monotono lineare ma presenti variazioni significative, riconducibili ad un andamento a campana, tra una miscela e l'altra. I diagrammi sono realizzati mostrando i valori di rigidezza per i tre quantitativi di W.P.M e per ogni variazione di %BA.A.

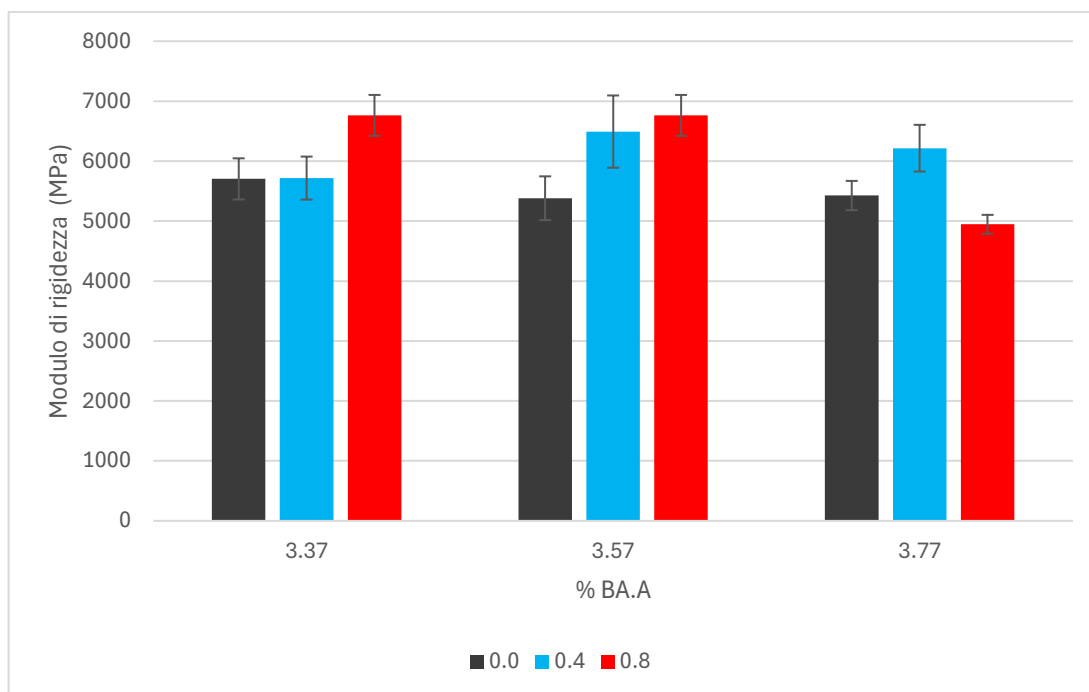


Grafico 4.14 Rappresentazione del modulo di rigidezza al variare del %BA.A e della %WPM

Quello che si può apprezzare per le diverse miscele, conferma quanto è stato osservato nell'analisi volumetrica. Le miscele realizzate con lo 0.4% WPM presentano il massimo valore di rigidezza per un BA.A pari a 3.57%, in questo senso, e sulla scorta dei risultati di ITS esposti nel paragrafo successivo, si può concludere che questa combinazione fornisce buoni risultati dal punto di vista meccanico, oltre che volumetrico.

Con contenuti di plastica maggiori (0.8% WPM) la miscela diventa instabile; infatti, l'elevata percentuale di vuoti unita al crollo del modulo di rigidezza sono indici del fatto che non ci sia più collaborazione tra gli aggregati.

Nel caso, infine, delle miscele prive di additivo polimerico si osserva un andamento concorde con il trend teorico: i valori medi decrescono all'aumentare del bitume, in quanto quest'ultimo produce un'azione "lubrificante" sugli aggregati.

4.3.2 Resistenza a trazione indiretta

Come già anticipato nel paragrafo 3.2.8 la resistenza a trazione indiretta rappresenta la massima tensione di trazione che può sopportare il materiale prima di raggiungere rottura, fornendo quindi un'indicazione sulla coesione interna della miscela bituminosa. Un valore elevato di ITS indica che il mastice (bitume + additivi + filler) riesce a mantenere saldamente uniti gli aggregati, resistendo efficacemente alle forze che tenderebbero a separare i granuli.

La prova dalla quale si ricava l'ITS viene effettuata alla temperatura 25 °C, in modo da favorire proprio la rottura per trazione e valutare la suscettibilità della miscela alle fessurazioni. In questo contesto di studio è importante in quanto chiarisce se l'additivo polimerico sta effettivamente migliorando il potere adesivo del bitume o se sta invece creando una struttura porosa che indebolisce la coesione complessiva.

Anche in questo caso si è prediletta una rappresentazione grafica a istogramma per l'esposizione dei risultati. Nuovamente, la miscela prodotta con lo 0.4% WPM mostra il valore massimo (1.91 MPa) in corrispondenza del 3.57% BA.A, il che è coerente con quanto osservato nell'analisi volumetrica, nella quale emergeva tale percentuale di bitume come contenuto ottimale.

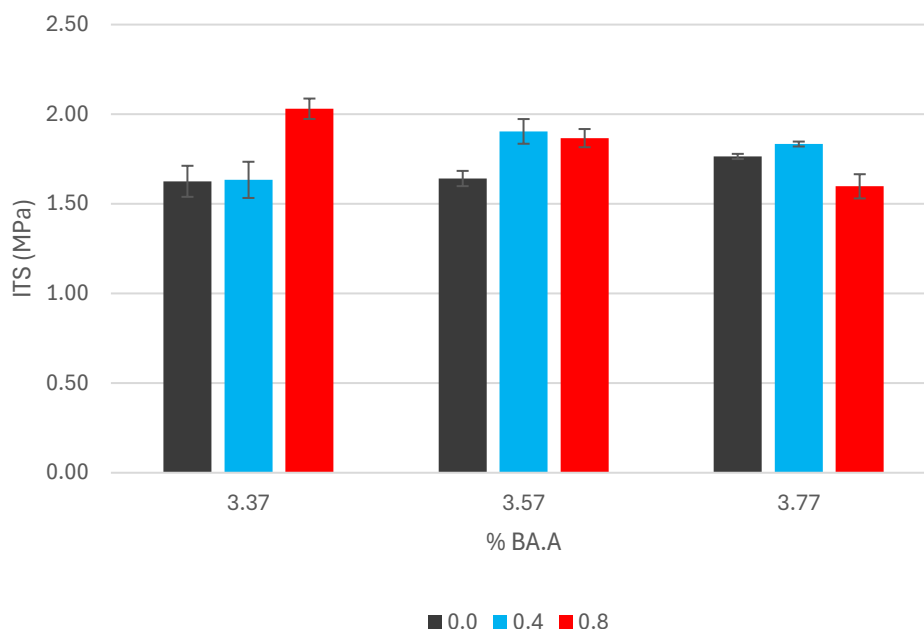


Grafico 4.15 Rappresentazione del ITS al variare del %BA.A e delle %WPM

Interessante è l'analisi delle miscele modificate con lo 0.8% WPM, infatti per un 3.37% BA.A la plastica domina la miscela agendo come rinforzo strutturale rigido, mentre in corrispondenza di 3.77% BA.A si verifica il crollo fino a valori del 1.6 MPa. In questa condizione lo scheletro litico risulta essere molto "aperto", il che è indice del fatto che la plastica ha creato uno spazio tra gli aggregati tale per cui il bitume non riesce ad aderire efficacemente garantendo una struttura coesa. In tale processo di distanziamento, infatti, la plastica permane presumibilmente in forma indurita, va a ridurre il numero di punti di contatto tra gli aggregati lapidei.

Infine, nel caso della miscela di controllo, ovvero quella realizzata senza l'aggiunta del polimero, si nota la classica crescita graduale: più bitume viene aggiunto, più aumenta la coesione stabilizzandosi al valore di 1.74 MPa per un 3.77% BA.A.

4.4 Miscele di progetto

Una volta selezionata la distribuzione granulometrica di progetto 3 (paragrafo 4.1), l'obiettivo delle analisi condotte è stato quello di avere a disposizione un numero sufficiente di dati in modo tale da poter definire le miscele di progetto, ovvero le ricette che permettono di raggiungere delle caratteristiche volumetriche e meccaniche soddisfacenti.

In prima battuta ci si è concentrati sulle proprietà volumetriche cercando di selezionare il contenuto di bitume ottimale sulla base di una percentuale dei vuoti (come suggerito dal metodo di mix design SUPERPAVE) pari al 4%, per un numero di rotazioni della pressa a taglio giratoria corrispondente a N_{design} .

Nei paragrafi precedenti è emersa la scarsa efficacia della plastica sopra una certa quantità, il che ha portato a individuare due miscele di progetto. Nel seguito si riporta lo stesso grafico di cui al paragrafo 4.2.1, integrato con l'indicazione dei limiti imposti dal Capitolato e la percentuale target dei vuoti che si è scelta di considerare.

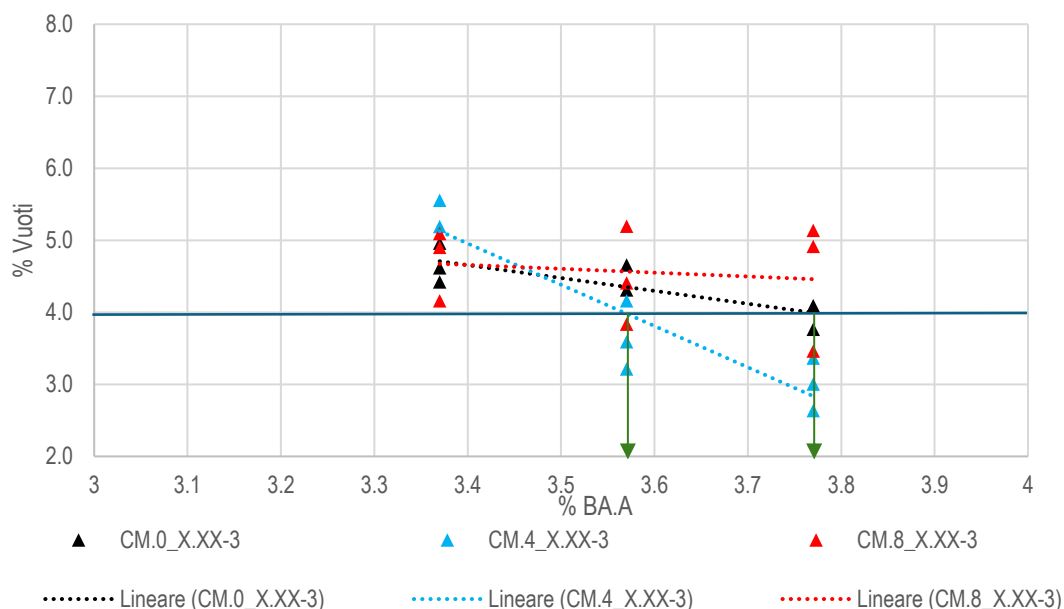


Grafico 4.16 Percentuali dei vuoti a 100 rotazioni con l'indicazione dei riferimenti da Capitolato ANAS

Si può pertanto concludere che i quantitativi di bitume ottimali sono:

- 3.57% BA.A per le miscele realizzate con lo 0.4% W.P.M;
- 3.77% BA.A per le miscele realizzate con lo 0.0% W.P.M.

Mentre non si è identificata alcuna miscela ottimale per lo 0.8% W.P.M. Queste informazioni sono state in seguito confermate dall'analisi delle prestazioni meccaniche, come peraltro si è già esposto al paragrafo 4.3.

Le suddette hanno permesso di identificare, in termini di denominazione, come ricette di progetto le seguenti:

- CM.4_3.57-3-A-1
- CM.0_3.77-3-A-1

5 Conclusioni

Il percorso di ricerca intrapreso in questo lavoro di tesi, inserito nel più ampio contesto del progetto Green Roads, ha permesso di dimostrare come la sostenibilità nelle infrastrutture stradali possa tradursi in soluzioni tecniche concrete e prestazionalmente accettabili. Attraverso un'attenta analisi di laboratorio, si è confermato che l'incorporamento dry delle plastiche riciclate post-consumo (MEGPO®) non rappresenta solo una strategia di smaltimento ecocompatibile, ma una vera e propria opportunità di miglioramento qualitativo dei conglomerati bituminosi per strati di collegamento.

Uno dei pilastri fondamentali della sperimentazione è stata la definizione dello scheletro litico ottimale. I dati raccolti hanno eletto la distribuzione granulometrica n. 3 come la configurazione di progetto più efficace, grazie a un incastro meccanico tra gli aggregati capace di garantire un assetto volumetrico più stabile rispetto alle altre varianti analizzate. Questa solida base strutturale ha permesso alla tecnologia dry di esprimere il suo massimo potenziale attraverso la formazione del cosiddetto PCA.

L'indagine sul dosaggio ha rivelato l'esistenza di un equilibrio preciso per l'efficacia del polimero. Si è infatti riscontrato che lo 0.4% di plastica (rispetto alla massa totale della miscela) rappresenta la soglia ottimale per innescare un comportamento sinergico con il legante bituminoso. In corrispondenza di tale valore, è stata validata l'ipotesi di una sostituzione parziale del bitume vergine: l'apporto polimerico ha permesso di ridurre il contenuto di legante aggiunto (calcolato sul peso degli aggregati) di circa il 10% (passando dal 3.77% al 3.57% BA.A), mantenendo al contempo il target volumetrico del 4% di vuoti a N_{design} . Al contrario, quantitativi superiori di plastica, come lo 0.8%, hanno manifestato un effetto "strutturante" eccessivo, portando a una struttura interna troppo aperta, instabile e meno incline alla collaborazione meccanica tra le fasi.

Le verifiche meccaniche hanno infine fornito il sigillo di qualità alle miscele di progetto individuate. La configurazione modificata CM.4_3.57-3-A-1 ha mostrato non solo una rigidità superiore, utile a una migliore ripartizione dei carichi, ma anche un picco di resistenza a trazione indiretta (ITS) pari a 1.91 MPa, superando i valori ottenuti con le miscele tradizionali prive di additivo. Tali prestazioni, unite al rigoroso rispetto dei Criteri Ambientali Minimi, dimostrano la maturità tecnologica di questo approccio.

I risultati ottenuti aprono interessanti prospettive per futuri approfondimenti sperimentali, in particolare per quanto riguarda il superamento dei limiti riscontrati con tenori di polimero più elevati. Sebbene la ricerca abbia individuato nello 0,4% la soglia ottimale, resta aperta la possibilità di valutare gli effetti protocolli termici più simulativi della produzione in impianto. Innalzando la temperatura di compattazione a 165°C, si potrebbe infatti favorire una fusione più efficace delle poliolefine presenti in MEGPO®, dal momento che il punto di rammollimento massimo si attesta proprio intorno ai 170°C. Uno studio mirato su questo protocollo per le miscele con lo 0,8% di plastica permetterebbe di verificare se una maggiore energia termica sia in grado di mitigare l'effetto "strutturante" e distanziatore riscontrato in questo studio.

In ultima analisi, il lavoro conferma che la transizione verso un'economia circolare nel settore stradale è possibile, trasformando costi di smaltimento e rifiuti post-consumo in risorse tecniche capaci di allungare la vita utile delle nostre pavimentazioni.

6 Bibliografia

1. <https://www.oecd.org/en/topics/plastics.html>, 2026. OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (consultato il 04/02/2026).
2. Shujie Zhao; Lile Cai; Quanyin Tan; Jinhui Li; Yufei Qin; 2026. Research on multi-dimensional decision-making method of plastic waste management. *Environmental Impact Assessment Review*, 119, 108360.
3. Dr. Ina Vollmer; Michael J. F. Jenks; Dr. Mark C. P. Roelands; Dr. Robin J. White; Dr. Toon van Harmelen; Dr. Paul de Wild; Dr. Gerard P. van der Laan; Dr. Florian Meirer; Prof. Jos T. F. Keurentjes; Prof. Bert M. Weckhuysen; 2020. *Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. Materials Science and Polymers*.
4. Valentina Beghetto; Noemi Bardella; Riccardo Samiolo; Vanessa Gatto; Silvia Conca; Roberto Sole; Giacomo Molin ; Andrea Gattolin; Nicola Ongaro; 2021. By-products from mechanical recycling of polyolefins improve hot mix asphalt performance, *Journal of Cleaner Production*, Volume 318, 128627, ISSN 0959-6526.
5. D. Movilla-Quesada; A.C. Raposeiras; L.T. Silva-Klein; P. Lastra-González; D. Castro-Fresno; 2019. Use of plastic scrap in asphalt mixtures added by dry method as a partial substitute for bitumen. *Waste Management*, 87, 751 – 760.
6. Giovanni Polacco; Stefano Berlincioni; Dario Biondi; Jiri Stastna; Ludovit Zanzotto; 2005. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, 41, 2831–2844.
7. Hasanain Radhi Radeef; Norhidayah Abdul Hassan; Ahmad Razin Zainal Abidin; Mohd Zul Hanif Mahmud; Nur Izzi Md. Yusoffa; Mohd Khairul Idham Mohd Satar; Muhammad Naquiddin Mohd, 2021. Enhanced Dry Process Method for Modified Asphalt Containing Plastic Waste. *Frontiers in materials*, volume 8, article 700231.
8. Marta Vila-Cortavitarte; Pedro Lastra-Gonzalez; Miguel Angel Calzada-Pérez; I. Indacoechea-Vega; 2019. The use of recycled plastic as partial replacement of bitumen in asphalt concrete. *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*, 327 – 347.
9. R. Vasudevan; A. Ramalinga Chandra Sekar; B. Sundarakannan; R. Velkennedy; 2012. A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 28, 311 – 320.

10. Mukul Rathore; Martins Zaumanis; 2020. Impact of laboratory mixing procedure on the properties of reclaimed asphalt pavement mixtures. *Construction and Building Materials*, 264, 120709.
11. Santagata, F., *Strade: Teoria e tecnica delle costruzioni stradali*, Volumi 1 e 2, Pearson, 2016.
12. Accordo quadro quadriennale per l'esecuzione di lavori di manutenzione straordinaria della pavimentazione - Centri Manutentori – 2020, Allegato D. Capitolato Speciale di Appalto, Norme Tecniche Pavimentazioni Stradali/Autostradali.
13. Decreto Ministeriale del 5 agosto 2024 (modifiche al DM 256/2022). Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE). Criteri Ambientali Minimi per l'affidamento del servizio di progettazione ed esecuzione dei lavori di costruzione, manutenzione e adeguamento delle infrastrutture stradali (CAM Strade).
14. The British Standard Institution (1997). *BS EN 932-1:1996: Tests for general properties of aggregates-Part 1: Methods for sampling*
15. The British Standard Institution (1999). *BS EN 932-1:1998: Tests for general properties of aggregates-Part 2: Methods for reducing laboratory samples*
16. The British Standard Institution (2012). *BS EN 933-1:2012 Test for geometrical properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*
17. The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-5:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 5: Determination of the maximum density*
18. The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-6:2020 Bituminous mixtures – Test methods Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*
19. The British Standard Institution (2018): *BS EN 12697-8:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*
20. The British Standard Institution (2017). *BS EN 12697-23:2017 Bituminous mixtures – Test methods Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*
21. The British Standard Institution (2018). *BS EN 12697-26:2018 Bituminous mixtures – Test methods Part 26: Stiffness*
22. The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-28:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 28: Preparation of samples for determining binder content, water content and grading.*
23. The British Standard Institution (2020): *BS EN 12697-29:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 28: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*

24. The British Standard Institution (2019). *BS EN 12697-31:2019 Bituminous mixtures – Test methods Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor*
25. The British Standard Institution (2016). *BS EN 12697-35:2016 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 35: Laboratory Mixing*
26. The British Standard Institution (2020). *BS EN 12697-39:2020 Bituminous Mixtures – Test Methods Part 39: Binder content by ignition*

7 Allegati

Il presente capitolo raccoglie la documentazione tecnica integrante i risultati discussi nel corpo dell'elaborato. Nello specifico, vengono riportati i fogli di sintesi relativi alle miscele confezionate con lo scheletro litico 3. Come evidenziato nell'analisi dei risultati, infatti, la distribuzione granulometrica n. 3 è stata selezionata come riferimento progettuale in virtù delle superiori prestazioni volumetriche riscontrate.

Ogni foglio di sintesi allegato fornisce un quadro analitico completo per ciascuna miscela, includendo:

- I dosaggi percentuali dei componenti (aggregati, RAP, bitume di apporto e plastiche MEGPO®).
- I parametri volumetrici rilevati tramite pressa a taglio giratoria (PTG).
- I risultati delle prove meccaniche, con particolare riferimento ai valori di modulo di rigidezza e resistenza a trazione indiretta (ITS).

Nome della miscela CM.0_2.87-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 e
 0.4% WP su mix

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%
Filler	2
0/5	35
3/8	0
5/15	16
15/25	22
0/6	0
0/20	25

Massa [g]
116.6
2040.4
0.0
932.8
1282.5
0.0
1457.4

Subtotali (g)

5829.8

BITUME DI APPORTO

70/100	2.87
--------	------

Massa [g]
167.3

167.3

ADDITIVI

Rejuvenator (% su RAP)	0.05
WP (% su miscela)	0

Massa [g]
2.9
0.0

2.91

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.0_2.87-3-A-1.1	2.569	2.573
CM.0_2.87-3-A-1.2	2.578	

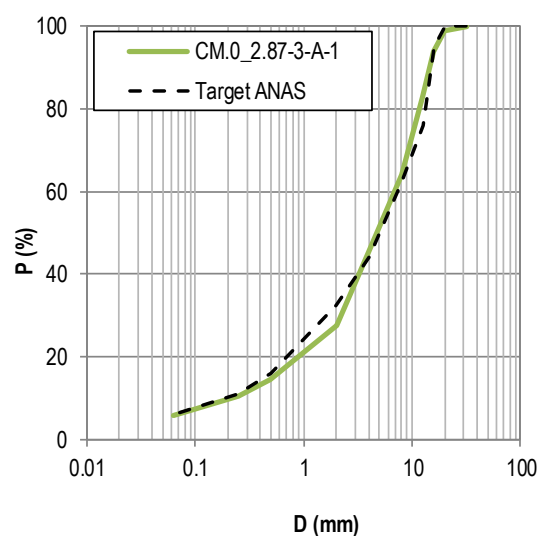
Prova di ignizione

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.0_2.87-3-A-1	2839.7	4288	4229.7	4.03	4.19

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	99.03
16	93.77
12.5	82.88
8	64.07
4	45.24
2	27.70
0.5	14.42
0.25	10.64
0.063	5.68
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	79
Totale pre-lavaggio	1390



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.0_2.87-3-A-1-1	1421.8	851.8	1433.9	20.3	2.438
CM.0_2.87-3-A-1-2	1421.6	852	1434.8	20.3	2.435
CM.0_2.87-3-A-1-3	1421.1	850.6	1434.3	20.3	2.430

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.0_2.87-3-A-1-1	5.83	7.50	15.93
CM.0_2.87-3-A-1-2	5.95	7.53	15.21
CM.0_2.87-3-A-1-3	6.13	7.80	15.64
Valori medi	5.97	7.61	15.59

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.573
B.M [%]	4.0
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.0_2.87-3-A-1-1	15.3	62.2
CM.0_2.87-3-A-1-2	15.4	61.7
CM.0_2.87-3-A-1-3	15.6	60.8
Valori medi	15.4	61.6

Modulo di rigidezza a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.0_2.87-3-A-1-1	4998.1	5220.8	Passed	5109
CM.0_2.87-3-A-1-2	5767.7	5535.4	Passed	5652
CM.0_2.87-3-A-1-3	5548.9	5325.5	Passed	5437
Valore medio				5399

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.0_2.87-3-A-1-1	77.2	18.142	4.504	1.496	52.16
CM.0_2.87-3-A-1-2	75.9	18.446	4.331	1.547	56.12
CM.0_2.87-3-A-1-3	77.3	17.563	4.430	1.446	51.28

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.496	53.2
Esito	Not Acceptable	NA

Nome della miscela CM.0_3.37-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%
Filler	2
0/5	35
3/8	0
5/15	16
15/25	22
0/6	0
0/20	25

Massa [g]
116.0
2030.6
0.0
928.3
1276.3
0.0
1450.4

Subtotali (g)

5801.6

BITUME DI APPORTO

70/100	3.37
--------	------

Massa [g]
195.5

195.5

ADDITIVI

Rejuvenator (% su miscela)	0.05
WP (% su miscela)	0.00

Massa [g]
2.9
0.0

2.9

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.0_3.37-3-A-1.1	2.554	2.559
CM.0_3.37-3-A-1.2	2.563	

Prova di ignizione

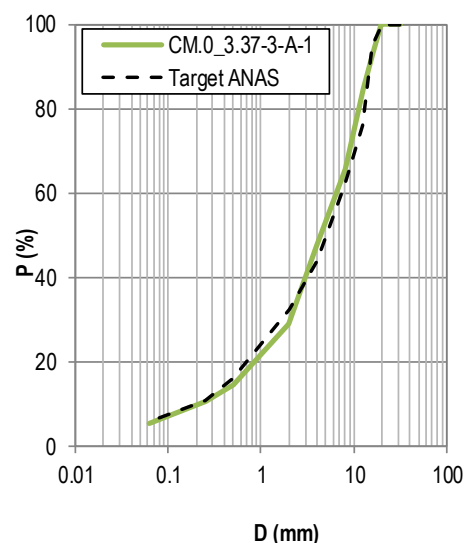
30/01/2025

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
#RIF!	#RIF!	#RIF!	#RIF!	#RIF!	#RIF!

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	100.00
16	93.06
12.5	84.59
8	65.74
4	47.35
2	28.93
0.5	14.66
0.25	10.61
0.063	5.58
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	76.2
Totale pre-lavaggio	1365.5



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.0_3.37-3-A-1-1	1410.4	849.9	1415.7	20.6	2.488
CM.0_3.37-3-A-1-2	1410.4	845.1	1416.5	20.6	2.464
CM.0_3.37-3-A-1-3	1410.5	848.2	1415.1	20.6	2.483

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.0_3.37-3-A-1-1	2.76	4.42	12.89
CM.0_3.37-3-A-1-2	3.71	4.96	12.91
CM.0_3.37-3-A-1-3	2.94	4.62	12.52
Valori medi	3.14	4.67	12.77

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.559
B.M [%]	4.5
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.0_3.37-3-A-1-1	14	78.0
CM.0_3.37-3-A-1-2	14.8	73.1
CM.0_3.37-3-A-1-3	14.2	76.8
Valori medi	14.3	76.0

Modulo di rigidezza a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.0_3.37-3-A-1-1	5921.6	5441.8	Passed	5682
CM.0_3.37-3-A-1-2	5363.8	5380.8	Passed	5372
CM.0_3.37-3-A-1-3	6033.7	6082.1	Passed	6058
Valore medio				5704

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.0_3.37-3-A-1-1	74.4	18.057	2.072	1.545	117.11
CM.0_3.37-3-A-1-2	74.6	18.916	2.026	1.615	125.19
CM.0_3.37-3-A-1-3	74.1	19.988	1.812	1.717	148.87

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.626	130.4
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.0_3.57-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3.
 Verifica trend ipotizzato.

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%	Massa [g]	Subtotali (g)
Filler	2	115.8	
0/5	35	2026.6	
3/8	0	0.0	
5/15	16	926.5	
15/25	22	1273.9	
0/6	0	0.0	
0/20	25	1447.6	
			5790.4

BITUME DI APPORTO

		Massa [g]	
70/100	3.57	206.7	206.7

ADDITIVI

		Massa [g]	
Rejuvenator (% su RAP)	0.05	2.9	
WP (% su miscela)	0	0.0	2.90

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT medio [Mg/m ³]
CM.0_3.57-3-A-1.1	2.563	2.559
CM.0_3.57-3-A-1.2	2.555	

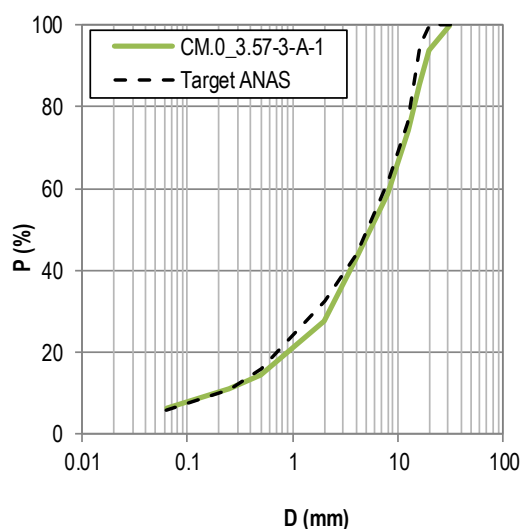
Prova di ignizione

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.0_3.57-3-A-1	1	2841.4	1428.8	63.70	4.46

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	93.90
16	85.47
12.5	74.22
8	58.80
4	42.69
2	27.63
0.5	14.54
0.25	11.03
0.063	6.30
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	84.4
Totale pre-lavaggio	1340.4



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.0_3.57-3-A-1-1	1411.8	850.2	1415.9	21.9	2.490
CM.0_3.57-3-A-1-2	1410.9	851.8	1415.8	21.9	2.496
CM.0_3.57-3-A-1-3	1410.9	846.6	1418.2	21.9	2.463

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.0_3.57-3-A-1-1	2.99	4.66	13.60
CM.0_3.57-3-A-1-2	2.76	4.31	13.10
CM.0_3.57-3-A-1-3	4.05	5.69	14.03
Valori medi	3.26	4.88	13.58

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.559
B.M [%]	4.7
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.0_3.57-3-A-1-1	14.4	79.3
CM.0_3.57-3-A-1-2	14.2	80.6
CM.0_3.57-3-A-1-3	15.4	73.3
Valori medi	14.7	77.7

Modulo di rigidità a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.0_3.57-3-A-1-1	5900.7	5378.3	Passed	5640
CM.0_3.57-3-A-1-2	5378.8	4866.8	Passed	5123
CM.0_3.57-3-A-1-3	5458.8	5473.6	Passed	5466
Valore medio				5410

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.0_3.57-3-A-1-1	73.9	19.400	1.471	1.671	178.48
CM.0_3.57-3-A-1-2	73.8	18.685	1.683	1.611	150.35
CM.0_3.57-3-A-1-3	74.5	19.466	1.787	1.663	146.13

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.649	158.3
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.0_3.77-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%	Massa [g]	Subtotali (g)
Filler	2	115.6	
0/5	35	2022.7	
3/8	0	0.0	
5/15	16	924.7	
15/25	22	1271.4	
0/6	0	0.0	
0/20	25	1444.8	
			5779.2

BITUME DI APPORTO

		Massa [g]	
70/100	3.77	217.9	217.9

ADDITIVI

		Massa [g]	
Rejuvenator (% su miscela)	0.05	2.9	
WP (% su miscela)	0.00	0.0	2.9

Massa totale della miscela [g] 6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.0_3.77-3-A-1.1	2.546	2.550
CM.0_3.77-3-A-1.2	2.554	

Prova di ignizione

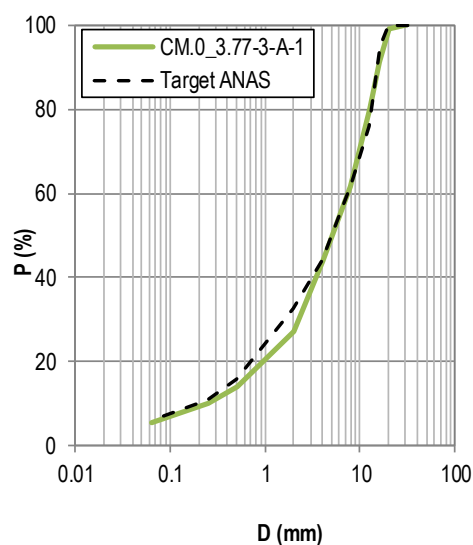
30/01/2025

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.0_3.77-3-A-1	2844.5	4275.8	4208.5	4.70	4.93

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	99.05
16	91.06
12.5	80.00
8	61.80
4	43.87
2	27.29
0.5	13.93
0.25	10.08
0.063	5.56
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	75.9
Totale pre-lavaggio	1364



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.0_3.77-3-A-1-1	1404.8	847.5	1408.1	20.6	2.501
CM.0_3.77-3-A-1-2	1404.8	841.5	1409.5	20.6	2.469
CM.0_3.77-3-A-1-3	1405.3	846.4	1408.5	20.6	2.495

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.0_3.77-3-A-1-1	2.18	3.76	12.61
CM.0_3.77-3-A-1-2	3.45	4.91	13.41
CM.0_3.77-3-A-1-3	2.41	4.09	12.57
Valori medi	2.68	4.26	12.86

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.550
B.M [%]	4.9
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.0_3.77-3-A-1-1	14.2	84.2
CM.0_3.77-3-A-1-2	15.2	77.7
CM.0_3.77-3-A-1-3	14.3	83.4
Valori medi	14.6	81.8

Modulo di rigidezza a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.0_3.77-3-A-1-1	5969.1	5228.3	Passed	5599
CM.0_3.77-3-A-1-2	5165.7	5515	Passed	5340
CM.0_3.77-3-A-1-3	5068.3	5438.8	Passed	5254
Valore medio				5398

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.0_3.77-3-A-1-1	73.3	20.433	1.733	1.775	160.81
CM.0_3.77-3-A-1-2	74.8	19.807	1.479	1.687	179.17
CM.0_3.77-3-A-1-3	73.5	20.240	1.387	1.754	198.61

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.739	179.5
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.4_3.37-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 e
 0.4% WP su mix

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%
Filler	2
0/5	35
3/8	0
5/15	16
15/25	22
0/6	0
0/20	25

Massa [g]
115.6
2022.4
0.0
924.5
1271.2
0.0
1444.6

Subtotali (g)

5778.2

BITUME DI APPORTO

70/100	3.37
--------	------

Massa [g]
194.7

194.7

ADDITIVI

Rejuvenator (% su RAP)	0.05
WP (% su miscela)	0.40233911

Massa [g]
2.9
24.1

27.03

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT medio [Mg/m ³]
CM.4_3.37-3-A-1.1	2.565	2.566
CM.4_3.37-3-A-1.2	2.566	

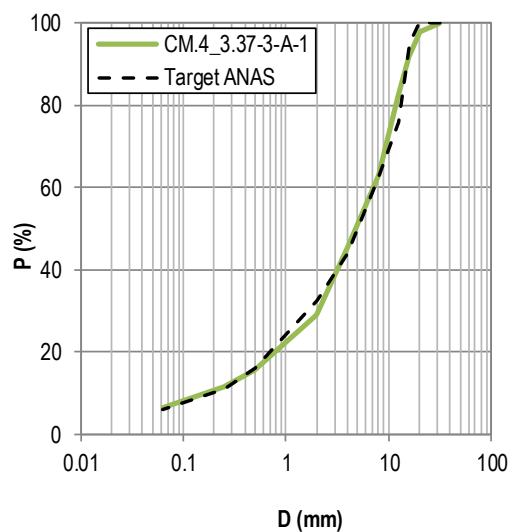
Prova di ignizione

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.4_3.37-3-A-1.1	2839.6	4215.3	4149.6	4.78	5.02

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	97.75
16	91.99
12.5	81.99
8	62.87
4	45.95
2	29.02
0.5	15.45
0.25	11.62
0.063	6.40
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	83.8
Totale pre-lavaggio	1310



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.4_3.37-3-A-1-1	1407.4	843.2	1415	21	2.457
CM.4_3.37-3-A-1-2	1406.9	839.9	1415.9	21	2.438
CM.4_3.37-3-A-1-3	1406.9	843.1	1412.4	21	2.466

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.4_3.37-3-A-1-1	4.25	5.77	14.24
CM.4_3.37-3-A-1-2	4.99	6.35	13.79
CM.4_3.37-3-A-1-3	3.87	5.40	13.67
Valori medi	4.37	5.84	13.90

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.566
B.M [%]	4.5
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.4_3.37-3-A-1-1	15.6	74.4
CM.4_3.37-3-A-1-2	16.3	70.7
CM.4_3.37-3-A-1-3	15.4	75.7
Valori medi	15.8	73.6

Modulo di rigidità a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.4_3.37-3-A-1-1	5412.4	5514.5	Passed	5463
CM.4_3.37-3-A-1-2	6216.6	5923.8	Passed	6070
CM.4_3.37-3-A-1-3	6135.2	5806.7	Passed	5971
Valore medio				5835

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.4_3.37-3-A-1-1	74.9	18.392	2.066	1.562	118.80
CM.4_3.37-3-A-1-2	75.4	18.567	2.239	1.568	110.01
CM.4_3.37-3-A-1-3	74.2	19.872	1.672	1.705	160.16

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.612	129.7
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.4_3.57-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%	Massa [g]	Subtotali (g)
Filler	2	115.3	
0/5	35	2018.5	
3/8	0	0.0	
5/15	16	922.8	
15/25	22	1268.8	
0/6	0	0.0	
0/20	25	1441.8	
			5767.2

BITUME DI APPORTO

		Massa [g]	
70/100	3.57	205.9	205.9

ADDITIVI

		Massa [g]	
Rejuvenator (% su RAP)	0.05	2.9	
WP (% su miscela)	0.4	24.0	26.88

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.4_3.57-3-A-1.1	2.550	2.553
CM.4_3.57-3-A-1.2	2.556	

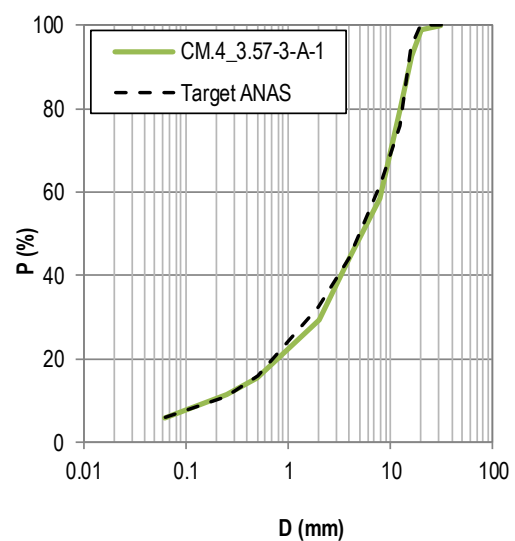
Prova di ignizione

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.4_3.57-3-A-1-1	2843.5	4239.5	4169.8	4.99	5.26

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	100.00
16	96.52
12.5	81.38
8	60.65
4	46.21
2	31.57
0.5	17.06
0.25	12.62
0.063	6.55
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	81.2
Totale pre-lavaggio	1326.3



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.4_3.57-3-A-1-1	1403.4	844.4	1408.8	17.4	2.483
CM.4_3.57-3-A-1-2	1404.2	847.7	1407.5	17.4	2.505
CM.4_3.57-3-A-1-3	1403.4	846.9	1407.9	17.4	2.499

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.4_3.57-3-A-1-1	2.73	4.16	12.38
CM.4_3.57-3-A-1-2	1.87	3.21	11.23
CM.4_3.57-3-A-1-3	2.14	3.59	11.58
Valori medi	2.24	3.65	11.73

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.553
B.M [%]	4.7
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.4_3.57-3-A-1-1	15	81.4
CM.4_3.57-3-A-1-2	14.3	86.2
CM.4_3.57-3-A-1-3	14.5	84.8
Valori medi	14.6	84.1

Modulo di rigidità a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.4_3.57-3-A-1-1	6603.8	6097	Passed	6350
CM.4_3.57-3-A-1-2	6078.8	5870	Passed	5974
CM.4_3.57-3-A-1-3	7199.4	7108.1	Passed	7154
Valore medio				6493

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.4_3.57-3-A-1-1	73.4	21.454	1.084	1.861	269.73
CM.4_3.57-3-A-1-2	72.1	21.162	1.175	1.868	249.67
CM.4_3.57-3-A-1-3	72.7	22.649	1.048	1.984	297.32

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.904	272.2
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.4_3.77-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 e
 0.4% WP su mix

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%	Massa [g]	Subtotali (g)
Filler	2	115.1	
0/5	35	2014.6	
3/8	0	0.0	
5/15	16	921.0	
15/25	22	1266.3	
0/6	0	0.0	
0/20	25	1439.0	
			5756.1

BITUME DI APPORTO

	Massa [g]	
70/100	217.0	217.0

ADDITIVI

	Massa [g]	
Rejuvenator (% su RAP)	2.9	
WP (% su miscela)	24.0	26.93

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m ³]	MMVT medio [Mg/m ³]
CM.4_3.77-3-A-1.1	2.541	2.536
CM.4_3.77-3-A-1.2	2.531	

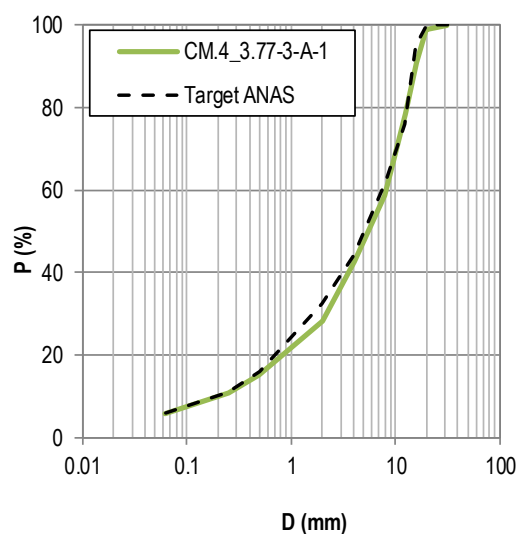
Prova di ignizione

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.4_3.77-3-A-1	2844.9	4191.5	4123.6	5.04	5.31

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	99.01
16	90.76
12.5	78.45
8	58.78
4	42.48
2	28.18
0.5	15.16
0.25	10.97
0.063	5.79
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	74
Totale pre-lavaggio	1278.7



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.4_3.77-3-A-1-1	1397.3	841.5	1400.1	21	2.497
CM.4_3.77-3-A-1-2	1398.2	839.8	1400.8	21	2.488
CM.4_3.77-3-A-1-3	1397.7	844.4	1400.2	21	2.510

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.4_3.77-3-A-1-1	1.54	3.00	11.05
CM.4_3.77-3-A-1-2	1.90	3.36	10.86
CM.4_3.77-3-A-1-3	1.02	2.63	11.32
Valori medi	1.49	3.00	11.08

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.536
B.M [%]	4.8
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.4_3.77-3-A-1-1	14.3	87.6
CM.4_3.77-3-A-1-2	14.7	84.9
CM.4_3.77-3-A-1-3	13.9	90.6
Valori medi	14.3	87.7

Modulo di rigidità a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.4_3.77-3-A-1-1	5783.8	5771.8	Passed	5778
CM.4_3.77-3-A-1-2	6568.7	6127.8	Passed	6348
CM.4_3.77-3-A-1-3	6622.5	6421.6	Passed	6522
Valore medio				6216

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.4_3.77-3-A-1-1	72.7	20.972	1.272	1.836	226.63
CM.4_3.77-3-A-1-2	72.7	20.762	1.224	1.819	233.42
CM.4_3.77-3-A-1-3	72.4	21.008	1.389	1.847	208.75

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.834	222.9
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.8_3.37-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%
Filler	2
0/5	35
3/8	0
5/15	16
15/25	22
0/6	0
0/20	25

Massa [g]
115.1
2014.3
0.0
920.8
1266.1
0.0
1438.8

Subtotali (g)

5755.0

BITUME DI APPORTO

70/100	3.37
--------	------

Massa [g]
193.9

193.9

ADDITIVI

Rejuvenator (% su miscela)	0.05
WP (% su miscela)	0.80

Massa [g]
2.9
48.2

51.0

Massa totale della miscela [g]

6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.8_3.37-3-A-1.1	2.539	2.543
CM.8_3.37-3-A-1.2	2.548	

Prova di ignizione

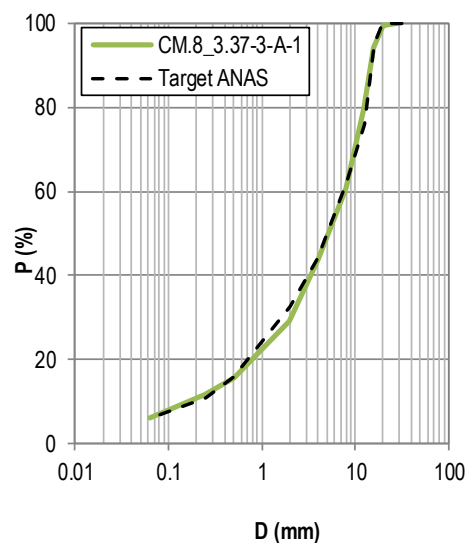
30/01/2025

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.8_3.37-3-A-1	2842.4	4268.7	4196.6	5.06	5.32

Analisi granulometrica

Setaccio [mm]	Passante progressivo [%]
31.5	100.00
20.0	99.33
16	94.01
12.5	79.79
8	60.52
4	44.05
2	29.24
0.5	15.85
0.25	11.74
0.063	6.03
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	81.6
Totale pre-lavaggio	1354.2



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.8_3.37-3-A-1-1	1401.7	840.2	1406.8	17.4	2.471
CM.8_3.37-3-A-1-2	1400.8	834.2	1406.9	17.4	2.443
CM.8_3.37-3-A-1-3	1402	841.2	1411.7	17.4	2.454

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.8_3.37-3-A-1-1	2.85	4.16	12.21
CM.8_3.37-3-A-1-2	3.95	5.09	12.73
CM.8_3.37-3-A-1-3	3.49	4.90	12.35
Valori medi	3.43	4.72	12.43

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.543
B.M [%]	4.5
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.8_3.37-3-A-1-1	15.5	80.7
CM.8_3.37-3-A-1-2	16.5	74.9
CM.8_3.37-3-A-1-3	16.1	77.1
Valori medi	16.0	77.6

Modulo di rigidità a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.8_3.37-3-A-1-1	7216.8	7510.4	Passed	7364
CM.8_3.37-3-A-1-2	7068.1	6818.6	Passed	6943
CM.8_3.37-3-A-1-3	7552.3	7548.7	Passed	7551
Valore medio				7286

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.8_3.37-3-A-1-1	73.5	23.557	0.983	2.041	326.21
CM.8_3.37-3-A-1-2	74.4	23.020	0.920	1.969	336.14
CM.8_3.37-3-A-1-3	73.4	23.998	0.675	2.081	484.29

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	2.030	382.2
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.8_3.57-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%	Massa [g]	Subtotali (g)
Filler	2	114.9	
0/5	35	2010.4	
3/8	0	0.0	
5/15	16	919.0	
15/25	22	1263.7	
0/6	0	0.0	
0/20	25	1436.0	
			5744.0

BITUME DI APPORTO

		Massa [g]	
70/100	3.57	205.1	205.1

ADDITIVI

		Massa [g]	
Rejuvenator (% su miscela)	0.05	2.9	
WP (% su miscela)	0.80	48.1	50.9

Massa totale della miscela [g] 6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.8_3.57-3-A-1.1	2.540	2.535
CM.8_3.57-3-A-1.2	2.530	

Prova di ignizione

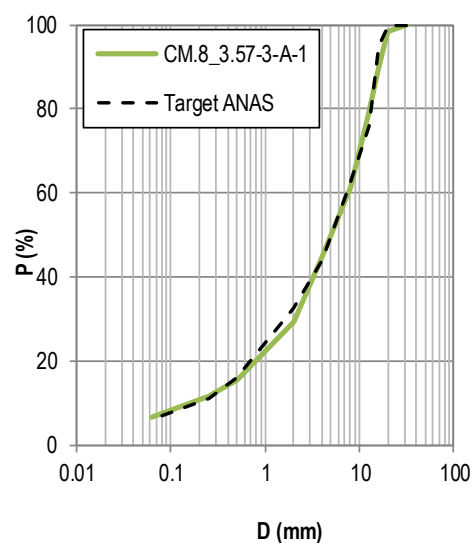
30/01/2025

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.8_3.57-3-A-1-2	2841.1	4212.5	4137.7	5.45	5.77

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	96.49
16	86.37
12.5	74.32
8	55.76
4	40.58
2	27.28
0.5	14.55
0.25	11.06
0.063	6.19
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	75.2
Totale pre-lavaggio	1307.9



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.8_3.57-3-A-1-1	1395.4	838.2	1401.8	20.9	2.471
CM.8_3.57-3-A-1-2	1396.9	831.6	1403.2	20.9	2.439
CM.8_3.57-3-A-1-3	1396.1	838.4	1404.1	20.9	2.463

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.8_3.57-3-A-1-1	2.53	3.83	11.85
CM.8_3.57-3-A-1-2	3.79	5.20	13.14
CM.8_3.57-3-A-1-3	2.84	4.41	12.82
Valori medi	3.06	4.48	12.60

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.535
B.M [%]	4.6
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.8_3.57-3-A-1-1	15.4	82.7
CM.8_3.57-3-A-1-2	16.6	75.8
CM.8_3.57-3-A-1-3	15.7	80.9
Valori medi	15.9	79.8

Modulo di rigidezza a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.8_3.57-3-A-1-1	6478.7	6906.5	Passed	6693
CM.8_3.57-3-A-1-2	6381.1	6544.2	Passed	6463
CM.8_3.57-3-A-1-3	7128	7140.3	Passed	7134
Valore medio				6763

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.8_3.57-3-A-1-1	73.5	21.720	1.120	1.882	263.96
CM.8_3.57-3-A-1-2	74.2	21.100	1.926	1.810	147.61
CM.8_3.57-3-A-1-3	73.4	21.998	1.365	1.908	219.50

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.867	210.4
Esito	Not Acceptable	Acceptable

Nome della miscela CM.8_3.77-3-A-1
 Descrizione COLLEGAMENTO + 25% GR 0/20 con rejuvenator, scheletro litico 3 a seguito di caratterizzazione aggregati in laboratorio (novembre 2025)

Quantitativi di materiale impiegati

AGGREGATI

Frazione	%	Massa [g]	Subtotali (g)
Filler	2	114.7	
0/5	35	2006.6	
3/8	0	0.0	
5/15	16	917.3	
15/25	22	1261.3	
0/6	0	0.0	
0/20	25	1433.3	
			5733.0

BITUME DI APPORTO

		Massa [g]	
70/100	3.77	216.1	216.1

ADDITIVI

		Massa [g]	
Rejuvenator (% su miscela)	0.05	2.9	
WP (% su miscela)	0.80	48.0	50.9

Massa totale della miscela [g] 6000

Massima Massa Volumica Teorica

Test ID	MMVT [Mg/m3]	MMVT medio [Mg/m3]
CM.8_3.77-3-A-1.1	2.530	2.535
CM.8_3.77-3-A-1.2	2.540	

Prova di ignizione

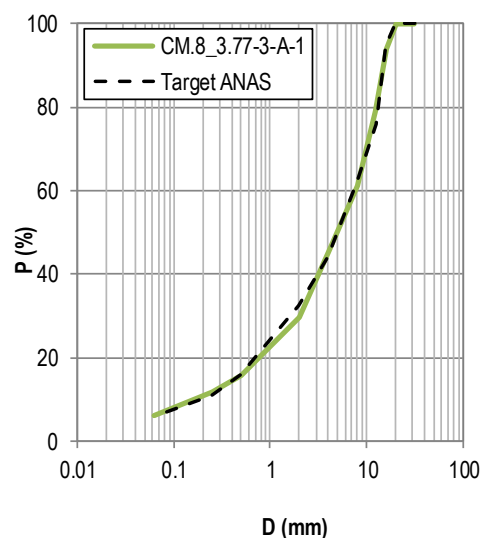
30/01/2025

Mix ID	m _{basket,prior} (g)	m _{basket,prior+material} (g)	m _{basket,after+material} (g)	B _{mix}	B _{aggregate}
CM.8_3.77-1-A-1	2845.5	4209	4134.8	5.44	5.76

Analisi granulometrica

Setaccio	Passante progressivo
[mm]	[%]
31.5	100.00
20.0	100.00
16	94.12
12.5	79.07
8	61.25
4	45.20
2	29.63
0.5	15.79
0.25	11.90
0.063	6.21
Pan	0.00

Filler perso nel lavaggio	80.1
Totale pre-lavaggio	1289.3



Bulk density

Test ID	M _{air} [g]	M _w [g]	M _{SSD} [g]	T [°C]	ρ _{SSD} [Mg/m ³]
CM.8_3.77-3-A-1-1	1390.8	835.5	1394.3	25.9	2.481
CM.8_3.77-3-A-1-2	1391.1	827.6	1397	25.9	2.435
CM.8_3.77-3-A-1-3	1391.7	829.1	1396.6	25.9	2.445

Prova di compattazione

Test ID	V ₁₈₀	V ₁₀₀	V ₁₀
CM.8_3.77-3-A-1-1	2.14	3.46	11.14
CM.8_3.77-3-A-1-2	3.94	4.91	13.21
CM.8_3.77-3-A-1-3	3.58	5.14	13.74
Valori medi	3.22	4.50	12.70

VMA e VFB

MMVT [Mg/m ³]	2.535
B.M [%]	4.8
P _b [Mg/m ³]	1.025

Specimen ID	VMA	VFB
CM.8_3.77-3-A-1-1	15.3	86.8
CM.8_3.77-3-A-1-2	16.8	77.6
CM.8_3.77-3-A-1-3	16.5	79.3
Valori medi	16.2	81.2

Modulo di rigidità a 25°C

Specimen ID	E ₁ (MPa)	E ₂ (MPa)	Check	E _m (MPa)
CM.8_3.77-3-A-1-1	5048.7	5042.8	Passed	5046
CM.8_3.77-3-A-1-2	4559.6	4968.6	Passed	4764
CM.8_3.77-3-A-1-3	5104.9	4953.1	Passed	5029
Valore medio				4946

ITS a 25°C

Specimen ID	Altezza media [mm]	Max P [kN]	Spostamento verticale [mm]	ITS [MPa]	CTI [MPa]
CM.8_3.77-3-A-1-1	73.3	18.112	2.375	1.573	104.05
CM.8_3.77-3-A-1-2	74.0	19.464	1.520	1.674	173.01
CM.8_3.77-3-A-1-3	73.5	17.839	2.206	1.546	110.08

	ITS [MPa]	CTI [MPa]
Valori medi	1.598	129.0
Esito	Not Acceptable	Acceptable