

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali



Relatore

Prof. Ezio Santagata

Correlatori

Prof. Davide Dalmazzo

Prof. Pier Paolo Riviera

Ing. Leonardo Urbano

Candidato

Antonio Stirparo

Anno accademico 2018-2019

Indice

| | |
|---|----|
| Introduzione | 1 |
| 1 Descrizione del progetto | 3 |
| 1.1 Origine del progetto di ricerca..... | 3 |
| 1.2 Campo prove | 4 |
| 2 Stato dell'arte..... | 7 |
| 2.1 Conglomerato bituminoso fresato: caratteristiche e impieghi..... | 7 |
| 2.1.1 Principali vantaggi e svantaggi | 8 |
| 2.1.2 Gli effetti sulla miscela | 10 |
| 2.2 Sludge: caratteristiche e principali impieghi | 12 |
| 2.3 Emulsione bituminosa: caratteristiche e principali impieghi | 14 |
| 2.4 Il riciclaggio a freddo: metodologie e applicazioni | 16 |
| 2.5 Applicazioni in strade a basso livello di traffico | 19 |
| 2.6 Collocazione del lavoro di tesi all'interno della letteratura analizzata..... | 21 |
| 3 Sperimentazione..... | 23 |
| 3.1 Obiettivi..... | 23 |
| 3.2 Programma sperimentale | 25 |
| 3.2.1 Pre-Sperimentazione | 25 |
| 3.2.2 Sperimentazione | 28 |
| 3.3 Nomenclatura delle miscele | 30 |
| 4 Materiali e metodi di prova..... | 31 |
| 4.1 Caratterizzazione fresato bituminoso | 31 |
| 4.1.1 Distribuzione granulometrica fresato bituminoso..... | 32 |
| 4.1.2 Determinazione MVA fresato bituminoso | 35 |
| 4.2 Caratterizzazione sludge..... | 37 |
| 4.2.1 Distribuzione granulometrica sludge | 37 |
| 4.2.2 Determinazione MVA sludge | 38 |
| 4.3 Caratterizzazione sabbia | 39 |
| 4.3.1 Distribuzione granulometrica sabbia..... | 39 |
| 4.3.2 Determinazione MVA sabbia..... | 40 |
| 4.4 Emulsione bituminosa | 41 |
| 4.5 Il modello di Funk e Dinger per la definizione dello scheletro litico delle miscele | 43 |
| 4.6 Definizione fase fluida ottimale con prova di spandimento..... | 46 |
| 4.7 Definizione fase fluida ottimale con tavola a scosse..... | 48 |
| 4.8 Miscelazione e compattazione dei campioni..... | 50 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.9 | Corelok e volumi reali | 52 |
| 4.10 | Rette di lavorabilità..... | 54 |
| 4.11 | NAT e modulo di rigidità..... | 56 |
| 4.12 | Pressa statica e prova di trazione indiretta | 59 |
| 4.13 | Compattatore a lastre | 61 |
| 4.14 | Resistenza all'ormaiamento | 63 |
| 5 | Analisi dati | 65 |
| 5.1 | Pre-sperimentazione..... | 65 |
| 5.1.1 | Definizione scheletro litico..... | 65 |
| 5.1.2 | Prova di spandimento | 67 |
| 5.1.3 | Tavola a scosse | 69 |
| 5.1.4 | Curve di compattazione e caratteristiche volumetriche..... | 72 |
| 5.1.5 | Modulo di rigidità..... | 75 |
| 5.1.6 | Resistenza a trazione indiretta | 76 |
| 5.2 | Conclusioni pre-sperimentazione..... | 77 |
| 5.3 | Sperimentazione..... | 78 |
| 5.3.1 | Definizione scheletro litico..... | 82 |
| 5.3.2 | Prova di spandimento | 83 |
| 5.3.3 | Curve di compattazione e caratteristiche volumetriche..... | 84 |
| 5.3.4 | Modulo di rigidità..... | 89 |
| 5.3.5 | Resistenza a trazione indiretta | 90 |
| 5.3.6 | Resistenza all'ormaiamento..... | 91 |
| 5.4 | Conclusioni sperimentazione | 94 |
| | Conclusioni..... | 95 |
| | Bibliografia..... | 99 |

Introduzione

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di definire un set di miscele innovative composte da elevati tenori di materie prime seconde (fresato bituminoso e sludge) prodotte con tecnologia a freddo (il legante impiegato è l'emulsione bituminosa). Il fresato bituminoso è un sottoprodotto ottenuto dalla rimozione di strati di miscele bituminose costituenti pavimentazioni stradali giunte al termine della propria vita utile. La sludge si presenta sottoforma di limo ed è un rifiuto ottenuto da processi di produzione di aggregati.

Per miscele innovative si intendono miscele che presentano primarie caratteristiche di sostenibilità ambientale ed economica, congiunte ad elevate performance meccaniche.

Per realizzare miscele sostenibili da un punto di vista ambientale, nel presente lavoro si è deciso di impiegare elevati dosaggi di materie prime seconde, limitando l'utilizzo di materiale vergine (sabbia). L'ulteriore valore aggiunto in termini di sostenibilità ambientale è conferito dalla tecnica di produzione a "freddo". In questo modo, non sarà richiesto riscaldare le frazioni granulari e il legante, come avviene per le miscele bituminose tradizionali, prevenendo quindi l'emissione di sostanze nocive nell'ambiente.

Alla sostenibilità ambientale, si vuole associare anche quella economica, da legare sia al costo dei materiali costituenti le miscele sia alle modalità di produzione e messa in opera. Impiegando dosaggi di fresato bituminoso e sludge in quantità superiori al 90%, si riesce a mettere in atto un notevole risparmio economico sull'intero costo dei materiali di base. Inoltre, ricorrendo alla tecnologia di produzione a "freddo", si abatterà una larga parte dei consumi energetici poiché non sarà richiesto riscaldare la miscela di aggregati e il legante. Per quanto riguarda le modalità di messa in opera, l'idea ambiziosa è quella di realizzare miscele altamente lavorabili (con propensione a fluidità e auto-compattazione). Miscele con queste caratteristiche richiederanno un utilizzo ridotto dei mezzi di cantiere normalmente impiegati per le miscele tradizionali.

La tecnologia di produzione adottata, inoltre, genera risvolti positivi anche sulla salute degli operatori: si ridurranno i rischi termici normalmente presenti nei conglomerati tradizionali poiché le operazioni di stesa verranno realizzate a temperatura ambiente.

Non da ultimo, le miscele con peculiari caratteristiche di sostenibilità ambientale ed economica devono presentare caratteristiche meccaniche tali da assicurare la corretta funzionalità una volta messe in opera. Si è pensato di impiegare tali miscele per strade secondarie a basso livello di traffico.

Al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati, la campagna di indagine è suddivisa in due parti: pre-sperimentazione e sperimentazione.

Uno degli aspetti che conferisce originalità al presente lavoro di tesi risiede nell'utilizzo di strumenti inconsueti per quanto concerne la progettazione delle miscele bituminose prodotte con tecnologia a "freddo". Infatti, la definizione dello scheletro litico (utilizzando il modello di Funk e Dinger) e della fase fluida ottimale (ottenuta mediante prova di spandimento) è realizzata seguendo un approccio solitamente impiegato per le miscele cementizie autocompattanti (Self Compacting Concrete). Da qui nasce la necessità della fase di pre-sperimentazione, in modo da collaudare e mettere a punto tutti gli strumenti e i protocolli di prova da utilizzare durante la fase di sperimentazione.

La fase di sperimentazione, quindi, è il luogo in cui si conducono studi più approfonditi e dettagliati, ricorrendo agli strumenti e protocolli precedentemente collaudati, per

definire un set di miscele che rispondano agli obiettivi posti alla base del presente lavoro di tesi (sostenibilità economica e ambientale e coerenti performance meccaniche).

Agli studi di laboratorio, seguirà un'analisi di campo tramite la costruzione di un campo prove di larghezza pari a 3 metri per una lunghezza di 60 metri. Il set di miscele definito con la presente sperimentazione sarà supportato da una fondazione in misto granulare con spessore finale compattato pari a 20 cm, supportata dal terreno naturale adeguatamente preparato.

Vista l'attuale emergenza sanitaria e rispettando le decisioni governative prese durante la redazione del presente elaborato, si è deciso di rinviare la sperimentazione di campo ad un momento in cui tutta l'Italia verserà in condizioni più serene.

Il presente lavoro di tesi è suddiviso in capitoli, ognuno dei quali descrive una fase del progetto sviluppato:

- Capitolo 1: **Descrizione del progetto**, nel quale sono state riportate l'origine del lavoro e le figure coinvolte;
- Capitolo 2: **Stato dell'arte**, nel quale sono stati illustrati casi simili trattati in letteratura con l'obiettivo di incrementare le conoscenze sul tema sviluppato;
- Capitolo 3: **Sperimentazione**, nel quale sono stati riportati gli obiettivi e il programma sperimentale seguito per perseguire gli obiettivi;
- Capitolo 4: **Materiali e metodi di prova**, in cui si riportano le caratteristiche dei materiali di base e le metodologie di prova;
- Capitolo 5: **Analisi dei risultati**, nel quale vengono riportati l'elaborazione dei dati e i commenti sui risultati ottenuti.

1 Descrizione del progetto

1.1 *Origine del progetto di ricerca*

Nel corso degli ultimi anni, attenzione particolare è stata data allo sviluppo di nuove infrastrutture stradali per soddisfare l'esigenza di volumi di traffico sempre crescenti. Lo sviluppo di strade per ospitare volumi di traffico sempre maggiori ha messo in secondo piano le strade secondarie lasciandole, molto spesso, in uno stato di abbandono. Le strade secondarie o strade a basso livello di traffico sono, secondo la classificazione AASHTO, strade in cui il traffico medio giornaliero è inferiore o uguale a 400 veicoli [1]. Nel mondo circa il 70%-75% di strade ha un traffico medio giornaliero inferiore a 400 veicoli. Le strade secondarie, spesso trascurate, permettono di incrementare l'accessibilità dei luoghi. La perdita di accessibilità, secondo Robert Douglas [1], è considerata una delle cinque dimensioni chiave della povertà. La presenza di questi tipi di strade permette la gestione e l'estrazione di risorse da zone rurali o non sviluppate grazie all'incremento di accessibilità.

Il presente lavoro di tesi si prefigge l'obiettivo di definire un set di miscele innovative da impiegare per la realizzazione della sovrastruttura di strade secondarie a basso volume di traffico. Per miscele innovative si intendono miscele tecnicamente performanti e sostenibili da punto di vista ambientale ed economico.

Il punto di partenza del lavoro qui discusso risiede dalla necessità di un'impresa locale, che si occupa della gestione e della manutenzione dell'autostrada A32 Torino-Bardonecchia, di pavimentare le strade di pertinenza autostradale per consentire un più rapido e sicuro accesso ai punti "strategici" (pile dei viadotti, opere idrauliche, ...) dell'infrastruttura. Attualmente, l'impresa "migliora" la superficie viabile delle strade pertinenziali (che possono essere catalogate come strade secondarie a basso volume di traffico) impiegando del fresato bituminoso a "secco" (non è prevista la presenza di alcun tipo di legante), stendendolo e compattandolo. Come facilmente immaginabile, la sovrastruttura così definita ha una limitata vista di servizio.

Adoperandosi nel contesto appena esposto, con questo lavoro di tesi si vuol definire un set di miscele con prestazioni meccaniche conformi con la destinazione d'uso descritta e, al tempo stesso, sostenibili da un punto di vista ambientale ed economico.

Le miscele studiate saranno costituite principalmente da materie prime seconde (fresato bituminoso e sludge), con una modesta frazione di sabbia, e legate con emulsione bituminosa. In seguito alle operazioni di fresatura che l'impresa esegue sull'autostrada A32, vi è un imponente accumulo di fresato bituminoso (RAP) presso il proprio impianto. Inoltre, l'impresa dispone di un materiale di scarto ottenuto da operazioni di taglio e lavaggio dei materiali lapidei, ossia la "sludge". Quindi, tenendo conto dei materiali di base e della tecnologia produttiva, si può affermare che è possibile garantire sostenibilità sia ambientale che economica. Un plus concernente la sostenibilità economica è conferito dalle modalità di messa in opera: l'idea ambiziosa è quella di realizzare miscele altamente lavorabili (con propensione a fluidità e auto-compattazione), in modo da ridurre le lavorazioni dei mezzi di cantiere normalmente impiegati per le miscele tradizionali.

1.2 Campo prove

Agli studi di laboratorio, seguirà un'analisi di campo tramite la costruzione di un campo prove al fine di poter ricevere informazioni su scala maggiore e migliorare le miscele progettate.

Le prove di campo verranno realizzate su un campo prove di larghezza pari a 3 metri per una lunghezza di 60 metri, impiegando il set di miscele definito con la sperimentazione di laboratorio. La lunghezza complessiva sarà divisa in tre lotti, ciascuno da venti metri, per sperimentare appunto ciascuna delle tre miscele progettate, come riportato in Fig. 1.1.

| | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 60 m | | | |
| | 20 m | 20 m | 20 m |
| 3 m | Mix2-S | Mix3-S | Mix4-S |

Fig. 1.1 Suddivisione in lotti del campo prove

Il set di miscele definito con la presente sperimentazione sarà supportato da una fondazione in misto granulare con spessore finale compattato pari a 20 cm, supportata dal terreno naturale adeguatamente preparato. A tale scopo, è necessaria la caratterizzazione del sottofondo mediante prove di carico su piastra. In Fig. 1.2 è riportata la stratigrafia del campo prove.

| |
|---|
| Mix2-S, Mix3-S, Mix4-s <ul style="list-style-type: none">• 10 cm (spessore finale compattato) |
| BASE <ul style="list-style-type: none">• Misto granulare non legato• Spessore 15-20 cm• Portanza fissata (LWD) |
| TERRENO (scotico e compattazione) |

Fig. 1.2 Stratigrafia del campo prove

Per quanto concerne le modalità di produzione delle miscele, si prepara esternamente mediante pala caricatrice un cumulo formato da fresato bituminoso, sludge e sabbia le cui quantità devono tener conto anche il grado di umidità di ciascuna delle tre frazioni. La miscela così ottenuta verrà introdotta, sempre tramite la pala caricatrice, nel blender all'interno del quale avviene la miscelazione con acqua d'aggiunta ed emulsione. Il blender è dotato di una tramoggia interna che contiene la miscela di e, attraverso un nastro trasportatore, tale miscela è convogliata alla camera di miscelazione, nella quale sono inviate sia l'acqua di aggiunta sia l'emulsione bituminosa, stoccate in serbatoi esterni. Il materiale così prodotto è riversato nella finitrice, con la quale creare uno strato con spessore di circa 15 cm, a cui seguirà la compattazione verrà effettuata con i rulli compattatori a disposizione dell'azienda.

La sperimentazione di campo è momentaneamente rinviata data la situazione di emergenza sanitaria e le conseguenti decisioni governative in atto. Quando questo difficile momento terminerà, si procederà alla realizzazione della prova che fornirà interessanti informazioni al fine di migliorare le miscele progettate in laboratorio.

2 Stato dell'arte

Come illustrato nel capitolo 1, l'attività di ricerca alla base del presente lavoro di tesi si è concentrata sullo studio e ottimizzazione di miscele contenenti materie prime seconde legate con emulsione bituminosa. Il principale interesse ricade nella definizione di un set di ricette – seppur in fase preliminare, a cui seguiranno fasi di studio più dettagliate – che possano garantire i principi di sostenibilità tecnica, economica e ambientale, da utilizzarsi per la costruzione della superficie carrabile di strade secondarie a basso volume di traffico.

Secondo Robert Douglas [1], pavimentare le strade secondarie permette di limitare la perdita di accessibilità ai territori, intesa come una delle cinque condizioni che induce alla povertà (oltre a carenza di risorse e reddito, vulnerabilità alle emergenze e alle calamità, debilitazione fisica). Le strade a basso livello di traffico, indicate anche come strade secondarie, sono strade in cui il traffico medio giornaliero è uguale o inferiore a 400 veicoli per giorno.

Nel presente caso di studio, ci si è concentrati sullo studio di miscele costituite da diversi materiali che comunemente sono conferiti in discarica, sebbene studi di settore evidenzino le loro potenzialità, se correttamente riciclati. La realizzazione di un set di miscele a base di fresato bituminoso e sludge per la costruzione di pavimentazioni di strade a basso traffico ha richiesto un preliminare studio della letteratura tecnica disponibile. Affinché la miscela possa essere correttamente progettata, è necessario conoscere in maniera adeguata i materiali e come questi sono impiegati in altri progetti.

2.1 Conglomerato bituminoso fresato: caratteristiche e impieghi

Il fresato bituminoso, indicato nella letteratura internazionale con la sigla RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), è una materia prima seconda largamente riutilizzata nella produzione di nuove miscele bituminose. Infatti, sono molteplici i benefici (tecnici, economici e ambientali) derivanti da una corretta procedura di riciclaggio.

Da uno studio condotto da EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) nel 2017 [2], si osserva una disponibilità di fresato bituminoso in Europa pari a 47.3 milioni di tonnellate, di cui Germania, Italia, Francia e Olanda sono produttrici del 27%, 19%, 14% e 10%, rispettivamente (Fig. 2.1).

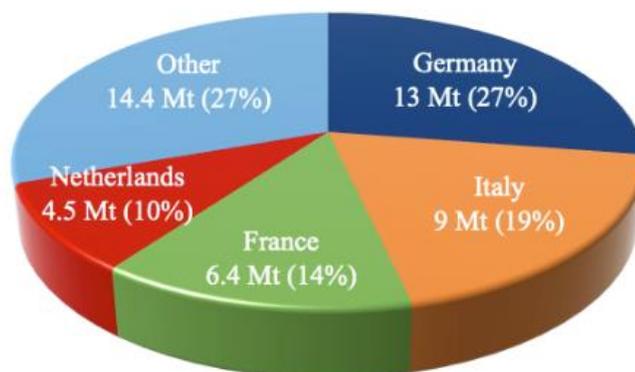


Fig. 2.1 Percentuale di RAP disponibile nei paesi europei [2]

In Fig. 2.2 è riportata, per alcune nazioni europee, la percentuale di riutilizzo di RAP in funzione del tipo di miscela.

| Country | All available Reclaimed Asphalt in 2017 in tonnes | % of available reclaimed asphalt used in | | | | | | Applied area in m ² of hot reuse of existing asphalt pavement material in-situ / on the road (Remixing, Repaving, Reshaping, Road Train etc.) | The amount of "only" reused (reused) asphalt material in-situ / on the road (Remixing, Repaving, Reshaping, Road Train etc.) in metric tonnes |
|----------------|---|--|----------------------------------|------------------|---------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| | | Hot and Warm Mix Asphalt Production | Half Warm Mix Asphalt Production | Cold Recycling** | Unbound Road Layers | Other Civil Engineering Applications | Put to Landfill /Other Applications/ Unknown | | |
| Austria | 1 650 000 | 60 | no data | no data | no data | no data | no data | no data | no data |
| Belgium | 1 030 | 95 | no data | no data | no data | no data | no data | no data | no data |
| Czech Republic | 2 600 000 | 14 | 0 | 30 | 20 | 10 | 26 | 381 280 | 418 000 |
| Denmark | 1 165 000 | 66 | 0 | 0 | 8 | 0 | 26 | no data | no data |
| Finland | 1 200 000 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 000 000 | no data |
| France | 6 400 000 | 70 | no data | no data | no data | no data | no data | 1 097 614 | 197 478 |
| Germany | 13 000 000 | 84 | 0 | 0 | 16 | 0 | 0 | no data | no data |
| Great Britain | 3 400 000 | | 90 | | 0 | 0 | 0 | no data | no data |
| Hungary | 120 000 | 95 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | no data | no data |
| Italy | 9 000 000 | 23 | no data | no data | no data | no data | no data | no data | no data |
| Netherlands | 4 500 000 | 71 | 0 | 11 | 0 | 0 | 18 | no data | no data |
| Norway | 1 101 000 | 30 | 0 | 1 | 69 | 0 | 0 | no data | no data |
| Slovakia | 50 000 | 96 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 130 000 | 16 000 |
| Slovenia | 84 000 | 24 | 0 | 6 | 10 | 0 | 60 | no data | no data |
| Spain | 494 000 | 83 | 0 | 0 | 14 | 0 | 3 | no data | no data |
| Turkey | 2 570 589 | 9 | 0 | 6 | 85 | 0 | 0 | no data | no data |

Fig. 2.2 Percentuale di riutilizzo RAP nelle diverse miscele [2]

Da un punto di vista tecnico, una grande quantità di fresato bituminoso è riutilizzato all'interno di miscele bituminose, attraverso tecnologia calda (*Hot Mix Asphalt, HMA*), tiepida (*Warm Mix Asphalt, WMA*) e fredda (*Cold Mix Asphalt, CMA*). Inoltre, può essere impiegato per la definizione di strati non legati e per altre opere di ingegneria civile (riempimento di rilevati, scavi, infrastrutture ferroviarie, ...). Ungheria, Finlandia, Slovacchia e Belgio sono le nazioni che più in assoluto spingono sul riciclaggio a caldo: infatti, le percentuali di riciclo vanno dal 95% al 100%. Sebbene la Gran Bretagna sia una delle nazioni che produce meno fresato bituminoso, il 90% del RAP è reimpiegato per i Warm Mix Asphalt. Per quanto riguarda il riciclaggio a freddo, i dati disponibili sono al quanto limitati e mostrano che la Repubblica Ceca ricicla circa il 30% di RAP a sua disposizione. Nonostante sia una delle nazioni con più fresato bituminoso a disposizione, il riciclaggio in Italia è ancora molto limitato. Infatti, soltanto il 23 % del RAP disponibile è riciclato con tecnologia calda mentre non ci sono informazioni concernenti il riciclo con tecnologia tiepida e fredda.

2.1.1 Principali vantaggi e svantaggi

Il fresato bituminoso è una miscela di aggregati ricoperti da bitume invecchiato: per la sua origine e composizione è la materia prima seconda che più si presta, in senso assoluto, per il riciclaggio all'interno di miscele bituminose (indipendentemente dalla tecnologia di produzione, che può essere HMA, WMA, CMA).

Da un punto di vista ambientale, i benefici maggiori sono riferiti al risparmio di aggregati lapidei vergini e legante bituminoso di origine idrocarbureca, salvaguardando così le fonti naturali di approvvigionamento non rinnovabili. Al tempo stesso, è possibile ridurre il conferimento in discarica e/o l'apertura di nuovi siti di stoccaggio, con conseguenti benefit sull'ambiente circostante.

Da un punto di vista economico, Zaumanis [3] ha stimato che il riciclo del 100% di RAP con tecnologia a caldo garantisce una riduzione dei costi nell'ordine del 50-70%, rispetto a miscele formate dal 100% di materiali vergini. In Fig. 2.3, è possibile osservare come varia il costo del conglomerato bituminoso al variare del contenuto di RAP.

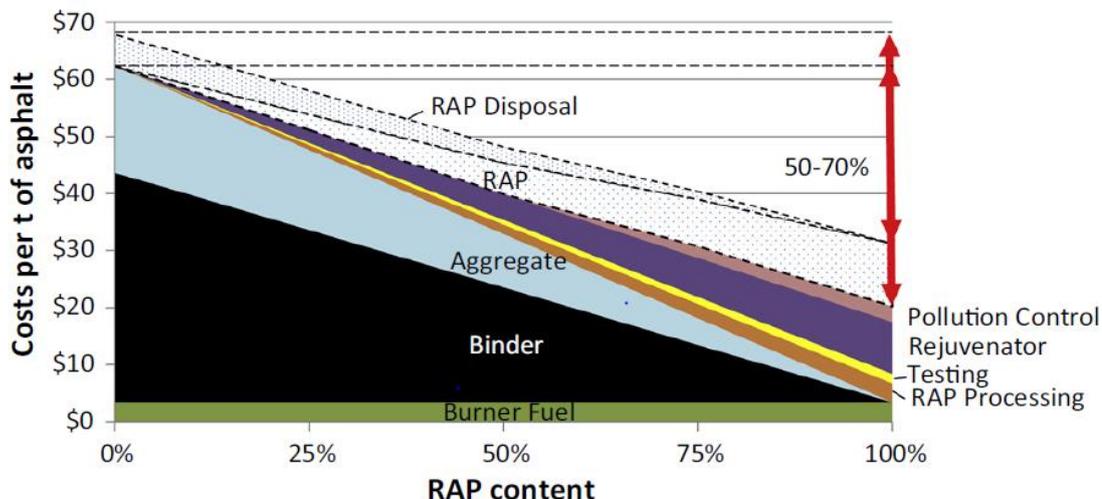


Fig. 2.3 Costo dei materiali in un riciclato a caldo [3]

All'aumentare del tenore di fresato bituminoso, il costo delle materie prime vergini (aggregati lapidei e legante bituminoso) decresce fino quasi ad annullarsi. Di contro, aumentano i costi per gli additivi rigeneranti (rejuvenators) e per i diversi controlli da realizzare sul fresato stesso. Inoltre, nel caso del riciclaggio in situ, vi è un ulteriore risparmio sulle spese di trasporto.

Oltre a benefici ambientali ed economici, il riutilizzo del fresato bituminoso genera impatti positivi anche in campo energetico e della sicurezza sui luoghi di lavoro [4].

Per quanto riguarda il riciclaggio con tecnologia a freddo, si sottolinea che la produzione avviene a temperatura ambiente senza la necessità di dover riscaldare aggregati e legante ad alte temperature, come avviene nel caso di conglomerati tradizionali, salvaguardando i consumi energetici. Inoltre, la possibilità di effettuare la stesa a temperatura ambiente genera risvolti positivi anche sulla salute degli operatori: si riducono, in questo modo, i rischi termici normalmente presenti durante la stesa ad alte temperature.

Bisogna tenere in conto, però, che solo dopo un'attenta caratterizzazione e analisi del fresato bituminoso a disposizione si riesce ad ottimizzare e ad incrementare le potenzialità del riciclaggio. Infatti, gli effetti sulle performance che genera il RAP sulla miscela bituminosa finale sono in parte legati:

- all'origine stratigrafica poiché il materiale fresato proveniente da uno strato di binder è costituito da materiali e quantitativi di bitume differenti rispetto ad uno strato di usura;
- alle modalità di recupero del conglomerato bituminoso.

Il tipo di pavimentazione influisce sulle caratteristiche finali del fresato. Ad esempio, il RAP ottenuto da una pavimentazione autostradale è differente da quello ottenuto da una pavimentazione di una strada urbana poiché la composizione e le caratteristiche dei materiali sono differenti [5]. Di conseguenza, il RAP estratto da una o dall'altra strada è costituito da aggregati e quantitativo di bitume differenti con conseguenze sulle sue performance. Affinché possa essere minimizzata la variabilità del RAP, è necessario evitare di stoccare insieme il fresato ottenuto da pavimentazioni differenti.

Un altro aspetto da tenere in considerazione è la presenza di bitume invecchiato (specialmente per gli HMA e WMA). Infatti, la miscela bituminosa finale risulterà più rigida rispetto ad una miscela senza fresato bituminoso, con conseguenti ricadute sulla risposta ai carichi ciclici e alle basse temperature. Massimizzare il riciclo con tecnologia a caldo o tiepida comporta una presa di conoscenza sullo stato del RAP, seguita da una serie di aggiustamenti nel mix design, introducendo un legante vergine meno rigido e/o additivi rigeneranti. Da un punto di vista reologico, i fenomeni di invecchiamento generano un complessivo irrigidimento e riduzione dell'angolo di fase del bitume, penalizzando la risposta alle basse temperature e la resistenza a fatica [6]. Da un punto di vista chimico, si denota una riorganizzazione delle componenti che costituiscono il bitume: infatti, la frazione dei saturi rimane pressoché inalterata, a differenza degli aromatici che evolvono in resine, che a loro volta si trasformano in asfalteni. Quindi, si riduce la frazione maltenica a favore di un maggior tenore di micelle solide: si svilupperà quindi un comportamento più rigido e quindi più fragile.

Il RAP si origina in seguito ad un processo di fresatura degli strati in conglomerato bituminoso, realizzata dalla fresatrice (Fig. 2.4).



Fig. 2.4 Fresatrice

La fresatura è garantita dalla presenza del tamburo di fresatura munito di diversi utensili da taglio [7]. Lo stato della pavimentazione (livello fessurativo, grado d'invecchiamento del bitume, temperatura) e la velocità di avanzamento della fresa influiscono sulle caratteristiche del prodotto finale. In generale, la distribuzione granulometrica del fresato è in deficit della parte fine per via della presenza di grumi di dimensioni più o meno grandi. In seguito all'operazione di fresatura, il RAP può essere poi trasportato in impianto per essere sottoposto a diversi processi quali: frantumazione, vagliatura e stoccaggio. In alternativa, è possibile riutilizzare il RAP direttamente in situ, attraverso tecniche a caldo o a freddo, con conseguente riduzione delle spese di trasporto.

2.1.2 Gli effetti sulla miscela

Generalmente, quando si ingloba il RAP all'interno di miscele bituminose prodotte a caldo, il mix design prevede l'aggiunta di legante vergine meno rigido rispetto a quello che richiederebbe un mix design senza fresato e/o additivi rigeneranti. L'obiettivo è quello di rendere meno rigido il bitume invecchiato presente all'interno del RAP [8], migliorando la risposta meccanica della miscela finale e preservando la vita utile della

pavimentazione rispetto ai fenomeni di degrado. In generale, l'interazione tra il bitume invecchiato proveniente dal RAP e il legante vergine può essere del tipo [8]:

- **Black rock**, in cui il bitume invecchiato che si trova in una condizione inertizzata non interagisce con il legante vergine portando quindi il RAP a comportarsi come aggregato all'interno della miscela;
- **Partial blending**, in cui vi è un'interazione parziale tra una parte del bitume invecchiato e il legante vergine;
- **Total blending**, in cui il bitume contenuto nel fresato interagisce completamente con il legante vergine.

Il grado di interazione che si osserva nella maggior parte dei casi è del tipo “partial blending” [9].

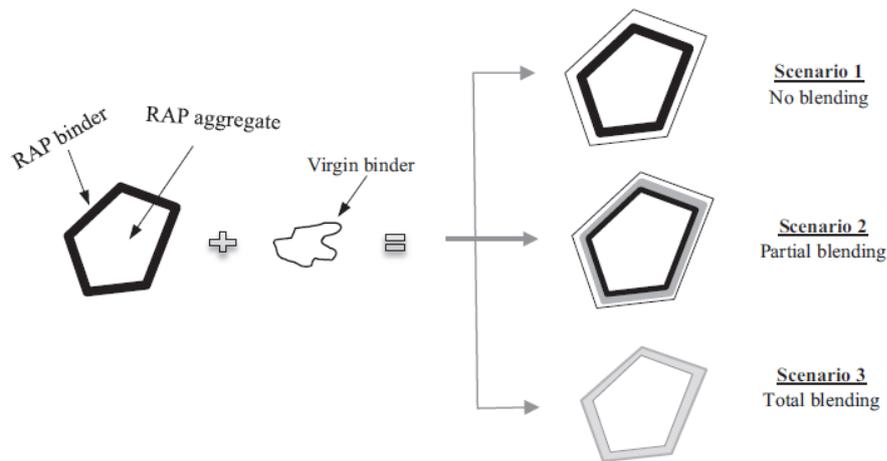


Fig. 2.5 Interazione tra il bitume contenuto nel fresato e il legante vergine [8]

In Italia, attualmente il fresato bituminoso è impiegato nelle infrastrutture stradali [10]:

- direttamente in situ come “aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici o bitume”;
- in impianto come “aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici”;
- in impianto come “aggregati più bitume” per la produzione di sottobasi, ecobasi e conglomerati bituminosi (CB) con controllo secondo Norma UNI EN 13108 – 8, per la Marcatura CE dei CB.

2.2 Sludge: caratteristiche e principali impieghi

Le operazioni di taglio e lavaggio realizzate per la produzione degli aggregati impiegati per miscele bituminose e cementizie danno origine a un rifiuto, che si presenta sottoforma di melma (anche definita come fanghi di lavaggio degli inerti di cava). All'interno del presente lavoro, i fanghi di lavaggio degli inerti di cava sono denominati "sludge". Giuridicamente, la sludge è a tutti gli effetti un materiale di rifiuto e viene disciplinato dal Catalogo Europeo dei Rifiuti al codice 010413.

Durante le fasi di produzione degli aggregati, l'usura degli utensili da taglio può portare alla presenza di parti metalliche all'interno della sludge. Tale problema ha frenato il riciclaggio della sludge poiché è necessario un trattamento preliminare al successivo impiego.

Da un punto di vista litologico, le caratteristiche della sludge sono fortemente variabili e dipendono principalmente dalla roccia madre (solitamente Feldspati, Quarzo e Calcite). Indipendentemente dalla roccia d'origine, in tutte le sludge sono riscontrabili due caratteristiche comuni: dimensione molto fine delle particelle e un elevato contenuto di acqua.

Proprio la dimensione molto fine delle particelle ha permesso di conferire un'adeguata lavorabilità, migliorandone la stabilità e prevenendone separazione e bleeding, ad una miscela con base cementizia messa a punto in uno studio condotto dal Laboratorio Materiali Stradali del Politecnico di Torino [11]. Lo scheletro solido della miscela in questione è formato da ghiaia (8-18 mm), sabbia (0-8 mm), RAP ($D_{max} < 12.5$ mm) e sludge. Oltre al cemento (il cui contenuto all'interno della miscela è variabile), si è impiegato un additivo superplasticizzante (il cui contenuto è fisso e pari a 0.5% sul peso di cemento). I componenti minerali, il RAP e il cemento sono combinati seguendo il modello di Funk e Dinger (Eq. 1.1), generalmente adottato per i calcestruzzi auto-compattanti (SCC, Self Compacting Concrete). In questo modo, si è raggiunto uno degli obiettivi del lavoro di Choorackal et. al, ossia la realizzazione di una miscela finale con caratteristiche di fluidità e di auto-compattazione.

Una misura della fluidità della miscela è ottenuta attraverso la prova di spandimento: si riempie di miscela un cilindro aperto superiormente e inferiormente e, in seguito al sollevamento del cilindro, il materiale fluisce e si misura l'impronta lungo due diagonali perpendicolari. Inoltre, è possibile identificare visivamente la presenza di eventuali problemi di segregazione o di bleeding.

Gli stessi materiali sono impiegati da Choorackal et al. [12] per definire una procedura di mix-design per miscele cementizie auto-compattanti contenenti RAP e sludge. Il mix-design prevede che gli aggregati siano combinati in modo da raggiungere la curva ideale di Funk e Dinger, anche conosciuta come modello di Anderson e Andreasen modificato (2.1):

$$P(D) = 100 \cdot \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (2.1)$$

dove "P(D)" è la percentuale di passante al setaccio con apertura delle maglie pari a "D", "D_{max}" è la dimensione massima dell'aggregato, "D_{min}" è la dimensione minima dell'aggregato e "q" è il parametro di distribuzione. Al variare di q cambia la composizione della miscela (al diminuire di q aumenta la concentrazione di frazione fine e viceversa; maggiori dettagli sono forniti al paragrafo 4.5). Per tale ragione si suggerisce la valutazione di diverse miscele ottenute variando il parametro di distribuzione oppure il

rapporto acqua/cemento per raggiungere il target di fluidità richiesto. Da un punto di vista meccanico, si suggerisce la realizzazione di prove di *modulo resiliente* e *quick shear test* verificando che il modulo resiliente sia sufficientemente alto e che le tensioni siano sufficientemente basse. Qualora nessuna miscela rispettasse i requisiti meccanici è necessario cambiare il parametro di distribuzione e/o il rapporto acqua/cemento ed eseguire nuovamente la procedura fino a quando non si ottiene una miscela che soddisfi i requisiti meccanici e di fluidità.

2.3 Emulsione bituminosa: caratteristiche e principali impieghi

L'emulsione bituminosa è una dispersione di due prodotti insolubili l'uno dall'altro che compongono due fasi distinte:

- la fase dispersa, che generalmente è costituita da un liquido più o meno viscoso (nella fattispecie è il legante bituminoso);
- la fase disperdente che è un liquido (nella fattispecie è l'acqua).

La dispersione del legante bituminoso in acqua è favorita dalla presenza di un terzo elemento, ossia l'agente emulsionante [7]. Gli agenti emulsionanti presentano una struttura molecolare costituita da due parti: catena idrocarburica non polare affine alla fase lipofila e gruppo polare dotato di proprietà idrofile. Grazie alla loro carica superficiale, si garantisce la stabilità del sistema prevenendo i fenomeni di separazione dell'acqua e del bitume.

In funzione della carica elettrica che il gruppo polare adotta in acqua, l'emulsione bituminosa può essere del tipo anionica, il cui gruppo polare è caricato negativamente, e cationica, il cui gruppo polare è caricato positivamente.

Oltre a favorirne la dispersione, l'agente emulsionante favorisce l'adesione del bitume residuo (separato dall'acqua in seguito alla rottura) sugli aggregati. La rottura dell'emulsione è il processo mediante il quale avviene la separazione tra l'acqua e il legante bituminoso in seguito al contatto con l'aggregato. Il processo di rottura (Fig. 2.6) può essere sostanzialmente riassunto in quattro fasi:

- Decantazione;
- Flocculazione;
- Coagulazione;
- Presa.

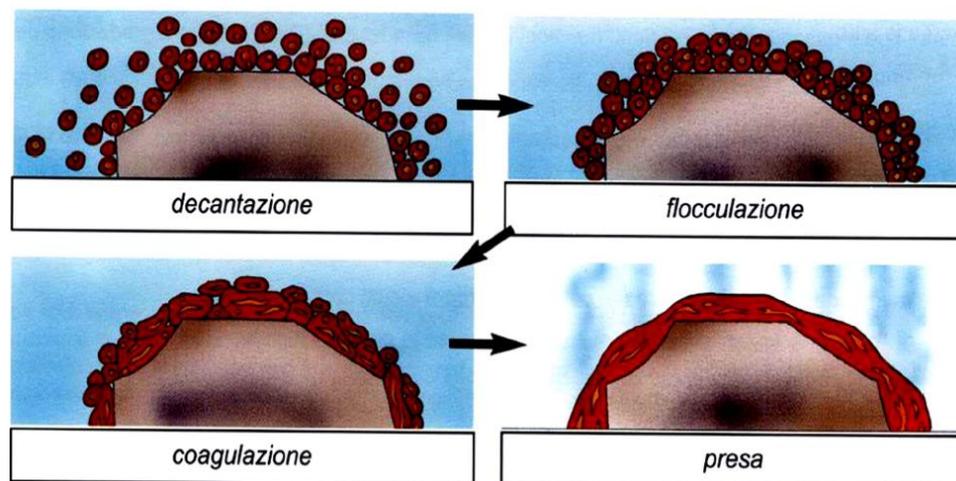


Fig. 2.6 Processo di rottura emulsione

Durante il processo di decantazione avviene la sedimentazione delle particelle di bitume. Nella fase di flocculazione avviene l'avvicinamento dei globuli sedimentati che in seguito alla loro fusione formano un coagulo (fase di coagulazione). Successivamente alla coagulazione, avviene la presa. In questa fase, l'acqua contenuta all'interno dell'emulsione viene allontanata facendo in modo che rimanga soltanto il bitume e che questo aderisca sull'aggregato.

In relazione alla velocità di rottura, le emulsioni bituminose si suddividono in:

- Emulsione super rapida (RR);
- Emulsione rapida (R);
- Emulsione media (M);
- Emulsione lenta (L)
- Emulsione sovrastabilizzata (LL).

Il tempo richiesto affinché l'emulsione rompa è in funzione della velocità di rottura e di altri fattori quali ad esempio le condizioni climatiche, la temperatura dell'emulsione e la natura degli aggregati. Per tale motivo è difficile associare un tempo "assoluto" alla rottura.

Un'altra particolarità importante da tenere in considerazione per l'emulsione bituminosa è la bassa viscosità che ne favorisce l'utilizzo a temperatura ambiente. La possibilità di lavorare a temperatura ambiente permette di limitare l'immissione di sostanze nocive in ambiente, di ridurre i consumi energetici e di diminuire i rischi relativi alle operazioni di cantiere. Il campo di applicazione dell'emulsione bituminosa è esteso: infatti, è utilizzata per le mani di attacco, i trattamenti superficiali e il riciclaggio a freddo di conglomerati bituminosi fresati. Le emulsioni che sono comunemente impiegate in ambito stradale contengono una quantità di bitume che generalmente varia tra il 40% e il 70%. In funzione del bitume residuo, le emulsioni bituminose vengono classificate in tradizionale o modificate.

2.4 Il riciclaggio a freddo: metodologie e applicazioni

La tecnica di riciclaggio a freddo permette di ottenere un prodotto finale con caratteristiche prestazionali elevate minimizzandone gli impatti ambientali e il dispendio di risorse economiche. Al contrario di quanto avviene per il riciclaggio a caldo, il riciclaggio a freddo permette di riutilizzare una quantità notevole di fresato (fino al 100%). I vantaggi delle tecniche a freddo possono essere riassunti nei seguenti punti [7]:

- Limitazione dello sfruttamento delle risorse ambientali non rinnovabili (aggregati lapidei vergini e legante bituminoso di origine idrocarburica);
- Risparmio energetico poiché, a differenza di quanto avviene nel riciclaggio a caldo, non è richiesto il riscaldamento a elevate temperature degli aggregati e bitume;
- Maggiore redditività poiché la durata della pavimentazione realizzata con tale tecnica è comparabile con la durata della pavimentazione realizzata con materiali vergini;
- Minore emissione in atmosfera di polveri e sostanze dannose.

Il processo di produzione per le miscele riciclate a freddo (Fig. 2.7) prevede che il fresato (eventualmente sottoposto a un processo di correzione granulometrica) venga miscelato con emulsione bituminosa o bitume schiumato, acqua, filler minerale e additivi rigeneranti. Qualora ce ne fosse la necessità, alla miscela di RAP è possibile aggiungere aggregati vergini oppure aggregati che possono derivare da altri processi di recupero. Quando per la realizzazione di una miscela si vuole adottare il metodo di riciclaggio a freddo è indispensabile conoscere:

- Granulometria degli aggregati recuperati;
- Proprietà del bitume invecchiato presente sugli aggregati recuperati;
- Granulometria degli aggregati vergini eventualmente aggiunti alla miscela.

Nelle tecniche di riciclaggio a freddo, vi è l'emulsione bituminosa che svolge una funzione legante lavorando a temperatura ambiente.

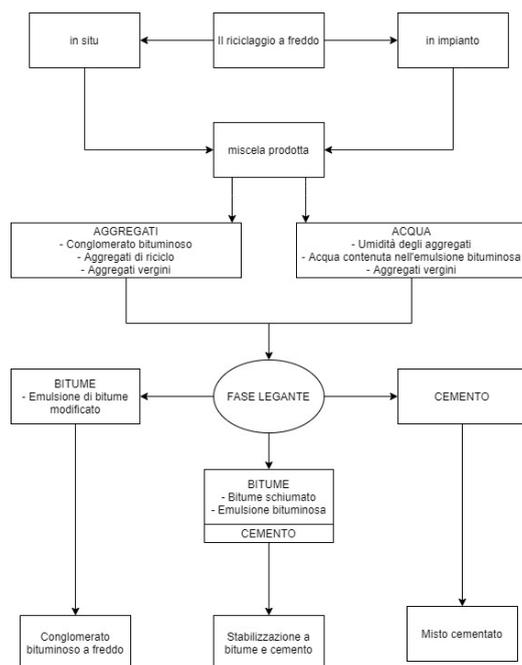


Fig. 2.7 La produzione delle miscele riciclate a freddo [7]

Si ottiene, così, una “nuova” miscela che può essere impiegata per la costruzione di alcuni layer della pavimentazione stradale, quali base o sottobase.

Il riciclaggio a freddo può essere realizzato in situ oppure in impianto.

Il **riciclaggio a freddo in situ** (Fig. 2.8) non richiede la movimentazione e lo stoccaggio del materiale fresato con conseguenti vantaggi di diversa natura [7]:

- Una minore durata dell'intervento per via dell'eliminazione di alcune fasi delle lavorazioni;
- Minori mezzi coinvolti e minore tempo di esposizione che riducono il rischio di incidenti;
- Riduzione dei costi economici;
- Minore disagio per gli utenti.

Il riciclaggio a freddo richiede la presenza delle macchine riciclatrici che, per mezzo del rotore di fresatura e miscelazione, polverizzano il materiale della pavimentazione esistente viaggiando solitamente nel senso opposto di marcia. Mentre tale macchina avanza, viene erogata, mediante un tubo flessibile, dell'acqua che è contenuta all'interno di un'autobotte. Il dosaggio dell'acqua è gestito accuratamente da un impianto di pompaggio controllato da microprocessore. Il rullo rotante mescola l'acqua con il materiale riciclato in modo da ottenere il grado d'umidità richiesto. Analogamente, nel vano di miscelazione possono essere posti anche altri leganti liquidi come l'emulsione bituminosa oppure una boiaccia cementizia. Il materiale uscente dalla riciclatrice viene compattato grazie all'azione di un rullo vibrante in modo da garantire un primo addensamento uniforme di tutto il materiale riciclato. Successivamente, il materiale viene nuovamente riprofilato per mezzo di una motolivellatrice prima della compattazione finale ad opera dei rulli gommati e vibranti.



Fig. 2.8 Riciclaggio in situ

Il **riciclaggio a freddo in impianto** (Fig. 2.9), a differenza di quello in situ, permette un controllo più accurato della miscela in quanto è possibile suddividere gli aggregati da utilizzare in diverse classi granulometriche ed eventualmente integrare, in maniera più precisa, frazioni e componenti carenti. Tale tecnica è da privilegiare nei seguenti casi:

- Nel caso di nuove costruzioni in modo da poter utilizzare il fresato stoccato e accumulato precedentemente;

- Nel caso di strade urbane in cui la presenza di “ostacoli” potrebbe limitarne l’operatività delle macchine che sono richieste per il riciclaggio in situ.

Una volta preparata, la miscela viene trasportata in cantiere e stesa mediante l’utilizzo di vibrofinitrici tenendo in considerazione che il tempo che intercorre tra la produzione e la stesa dovrebbe essere inferiore a due ore per evitare che la miscela risulti troppo rigida a seguito della rottura dell’emulsione.



Fig. 2.9 Riciclaggio in impianto mobile

2.5 Applicazioni in strade a basso livello di traffico

Le strade a basso livello di traffico, secondo AASHTO, sono strade in cui il traffico medio giornaliero è uguale o inferiore a 400 veicoli per giorno [1]. Nell'ora di punta, in queste strade, si registra mediamente un passaggio di un veicolo ogni minuto. La presenza di questi tipi di strade permette di gestire o estrarre risorse da zone rurali o non sviluppate grazie all'incremento di accessibilità [13].

Uno studio condotto da Gómez-Meijide et al. [14] evidenzia che miscele formate dal 100% di aggregati riciclati, provenienti da scarti di costruzione e demolizione (dall'inglese Construction and Demolition Waste, CDW), legati con emulsione bituminosa, risultano essere performanti per la costruzione di strade a basso livello di traffico. È stato effettuato un confronto tra miscele costituite da aggregati naturali (miscela NA) e aggregati riciclati (miscela CDWA). Gli aggregati costituenti la miscela CDWA provengono da calcestruzzi con malte, calcestruzzi con elementi metallici, calcestruzzi con fibre tessili, materiali contenenti gesso e plastiche. Gli aggregati utilizzati nella miscela NA e quelli utilizzati nella miscela CDWA sono stati sottoposti a prove di caratterizzazione (Los Angeles, equivalente in sabbia, indice di forma, indice di appiattimento). Il legante utilizzato all'interno delle miscele è un'emulsione bituminosa con contenuto di bitume residuo pari al 60%.

Sono confezionati provini con differente grado di umidità e contenuto di bitume, successivamente sottoposti a prove di caratterizzazione meccanica in modo da determinare i contenuti ottimi di acqua e bitume. Le prove meccaniche eseguite hanno riguardato la definizione della resistenza a rottura per compressione semplice (UCS), suscettibilità all'acqua, resistenza a trazione indiretta e modulo di rigidezza. Detta caratterizzazione meccanica ha evidenziato che la miscela CDWA, da un punto di vista meccanico, presenta caratteristiche più performanti. Le prove di modulo di rigidezza condotte a diverse temperature evidenziano una minore suscettibilità alle variazioni di temperatura della miscela CDWA rispetto a quella NA. Di conseguenza, esse, sono meno inclini a fessurarsi alle basse temperature e a deformarsi alle alte temperature. Quest'ultima caratteristica rende la miscela CDWA più adatta per le strade con volume di traffico medio/basso in cui le caratteristiche del sottofondo non sono buone.

In un altro studio condotto da Saride et al. [15], l'obiettivo è quello di osservare gli effetti dell'utilizzo di RAP (>50%) in sostituzione degli aggregati vergini (AV) in miscele da impiegare nelle strade indiane a basso traffico. La normativa indiana definisce come strade a basso traffico quelle in cui il traffico giornaliero è inferiore a 450 veicoli al giorno. Le miscele studiate sono formate da uno scheletro solido di RAP e aggregati vergini (AV) con le seguenti proporzioni (RAP : AV): 100:0, 80:20, 60:40. Esse sono state stabilizzate con ceneri volanti (indicati nella letteratura internazionale come *fly ash*), un sottoprodotto della combustione del carbone polverizzato negli impianti di generazione di energia elettrica [16]. Le ceneri volanti sono aggiunte in quantità crescenti nell'ordine del 10%, 20%, 30% e 40% sul peso delle tre miscele sopra menzionate.

Attraverso la metodologia Proctor, si è definito il contenuto d'acqua ottimale per ciascuna miscela. Da un punto di vista meccanico, la caratterizzazione effettuata ha permesso di definire la resistenza a rottura per compressione semplice, il modulo resiliente e il valore di CBR (California Bearing Ratio). Le prove realizzate hanno evidenziato che l'aggiunta di ceneri volanti ha un effetto benefico sulle performance meccaniche delle miscele. L'incremento di ceneri volanti influisce positivamente sulla resistenza a rottura per compressione semplice, modulo resiliente e indice CBR.

La miscela ottimale, formata da 80 % di RAP e 20 % di AV, mostra che le miscele ad elevato tenore di RAP possono funzionare in maniera ottimale nelle strade a basso livello di traffico.

Saride et al. hanno progettato una miscela con un approccio che viene solitamente utilizzato per le terre. Gómez-Meijide et al, invece, hanno seguito un approccio basato sulla massimizzazione delle performance meccaniche trattando la miscela con un approccio da conglomerato bituminoso prodotto con tecnologia a freddo. Sebbene gli approcci seguiti siano differenti, entrambi gli studi mostrano come materie prime seconde (CDW e RAP) possono essere una valida alternativa, in termini di performance meccaniche, ai materiali tradizionali, per la costruzione di strade a basso livello di traffico.

2.6 Collocazione del lavoro di tesi all'interno della letteratura analizzata

Come verrà meglio illustrato nel capitolo successivo, il presente lavoro di tesi si prefigge l'obiettivo di studiare miscele innovative con elevati tenori di materiali riciclati (in particolare RAP e sludge) per strade secondarie a basso volume di traffico. Studi di letteratura [14,15] evidenziano la propensione dei materiali di risulta provenienti dal comparto edile ad essere impiegati per strade a basso volume di traffico. Infatti, miscele con RAP e CDW, con o senza emulsione bituminosa, risultano essere una valida alternativa ai materiali convenzionali.

Oltre a raggiungere soddisfacenti performance meccaniche, le miscele studiate nella presente sperimentazione devono rispondere ai requisiti di economicità e sostenibilità ambientale. Da un punto di vista ambientale, è evidente che riciclare elevate quantità di RAP, in particolare con tecnologia a freddo, genera positivi impatti sull'eco-sistema [5,9]: in primo luogo non si appesantiscono ulteriormente le discariche e in secondo luogo la tecnologia a freddo permette di evitare l'emissione di sostanze inquinanti nell'ambiente. Da un punto di vista economico, come enunciato da Zaumanis et al., riciclare elevate quantità di RAP permette di abbattere i costi della miscela poiché non sono richiesti ulteriori materiali vergini. Nel presente studio, vantaggi economici sono ritrovabili nei materiali base e nella tecnologia di produzione. Inoltre, si è pensato di "abbattere" maggiormente i costi di produzione e lavorazione ricercando una miscela "auto-compattante": l'obiettivo è quello di avere delle miscele facilmente miscelabili e compatte. A tal fine, le composizioni sono definite attraverso il modello di Funk e Dinger e prodotte (in laboratorio) con elevati contenuti di acqua, definiti per mezzo della prova di spandimento [11,12].

3 Sperimentazione

Lo studio e la definizione di un set di miscele innovative, prodotte con tecnologia a freddo e composte da elevati tenori di materiali riciclati, ha richiesto una preliminare analisi della letteratura tecnica disponibile, come ampiamente illustrato nel Capitolo 2. Gli studi condotti da Gómez-Mejide et al. [14] e Saride et al. [15], seppure realizzati con approcci differenti, hanno dimostrato la propensione all'utilizzo di quantità elevate di materie prime seconde per la definizione di miscele innovative da utilizzare per la costruzione di strade secondarie a basso livello di traffico.

Il programma sperimentale illustrato nel presente capitolo è lo strumento attraverso il quale perseguire gli obiettivi definiti all'inizio del lavoro, ossia definire un set di miscele innovative, formate da elevate quantità di materie prime seconde. Le miscele così definite – sebbene in una fase preliminare, a cui seguiranno studi più dettagliati – possono essere impiegate per pavimentare strade secondarie a basso livello di traffico.

Il programma sperimentale è diviso in pre-sperimentazione e sperimentazione. Con la pre-sperimentazione si definiscono e mettono a punto tutti gli strumenti necessari da utilizzare durante la sperimentazione, ossia la fase finale del lavoro con la quale perseguire gli obiettivi prefissati. Uno degli aspetti che conferisce originalità al presente lavoro di tesi risiede nel fatto che alcuni degli strumenti impiegati non sono comuni per i materiali stradali, specialmente quelli prodotti con tecnologia a freddo. Si è reso, quindi, necessario dividere in due parti il programma sperimentale, in modo da calibrare gli strumenti e i protocolli di prova (pre-sperimentazione) per perseguire gli obiettivi finali (sperimentazione).

3.1 Obiettivi

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di definire un set di miscele innovative – seppur in uno stadio preliminare, a cui seguiranno degli studi più avanzati – composte da elevati tenori di materie prime seconde (principalmente RAP e sludge) prodotte con tecnologia a freddo (il legante impiegato è l'emulsione bituminosa). Il fresato bituminoso (RAP) è un mix di aggregati ricoperti da bitume invecchiato ed è la materia prima seconda più riciclata per la produzione di nuove miscele bituminose. La sludge si origina da operazioni di taglio e lavaggio dei materiali lapidei per la produzione di aggregati.

Per miscele innovative si intendono miscele tecnicamente valide con peculiari caratteristiche di sostenibilità economica e ambientale.

Le miscele studiate sono sostenibili da un punto di vista ambientale: infatti, si utilizza un modesto quantitativo materiale vergine (la sabbia) prediligendo materie prime seconde (RAP e sludge). Un plus in tale direzione è conferito dalla tecnologia produttiva a freddo poiché i suddetti materiali sono legati con emulsione bituminosa (miscelazione e compattazione a temperatura ambiente).

Inoltre, le miscele finali ben si prestano a rispondere a caratteristiche di economicità, intese come basso costo di produzione e semplicità di messa in opera. Per basso costo di produzione si intende la costituzione di miscele che siano economicamente vantaggiose sia dal punto di vista della composizione che delle tecnologie produttive. Va da sé che l'utilizzo di materie prime seconde (RAP e sludge) in dosaggi superiori all'80% genera una sostanziosa economia sul costo finale. La tecnologia produttiva adottata è del tipo a freddo che, oltre a massimizzare il riutilizzo di RAP, permette di abbattere i consumi

energetici, rispetto alle miscele prodotte con tecnologia a caldo. La tecnologia di produzione adottata, inoltre, genera risvolti positivi anche sulla salute degli operatori: si riducono i rischi termici normalmente presenti nei conglomerati tradizionali poiché le operazioni di stesa vengono realizzate a temperatura ambiente. Per ciò che concerne la semplicità di messa in opera, l'idea ambiziosa è quella di realizzare una miscela altamente lavorabile (con propensione a fluidità e auto-compattazione). In questo modo, sono richieste meno lavorazioni poiché i mezzi di cantiere, con ridotte operazioni rispetto ai materiali tradizionali, riusciranno a mettere in opera più agevolmente le miscele studiate.

Non da ultimo, la progettazione – e successiva messa in opera – di miscele con elevate quantità di materiali riciclati, legati con emulsione bituminosa e miscelati a freddo, deve soddisfare quei requisiti tecnici necessari per assicurare le corrette funzioni strutturali nel contesto delle strade secondarie a basso livello di traffico.

3.2 Programma sperimentale

Il programma sperimentale può essere sostanzialmente suddiviso in due parti:

- Pre-sperimentazione;
- Sperimentazione.

La fase di pre-sperimentazione è il momento in cui si definiscono e mettono a punto gli strumenti necessari per raggiungere gli obiettivi prefissati (fase di sperimentazione). Come anticipato, uno degli aspetti che conferisce originalità al presente lavoro di tesi risiede nel fatto che alcuni degli strumenti impiegati non sono comuni per i materiali stradali (in particolare quelli prodotti con tecnologia a freddo). Infatti, si è ricorso ad un modello solitamente adottato per le miscele cementizie autocompattanti (SCC, Self Compacting Concrete) per la definizione della struttura litica delle miscele. Così come lo studio della fase fluida segue la comune prassi per le miscele cementizie del tipo SCC. I materiali utilizzati durante la fase di pre-sperimentazione erano già presenti in laboratorio poiché forniti dal committente per altri progetti di ricerca.

Solo dopo aver messo a punto tutti gli strumenti necessari, si è deciso di aprire la fase di sperimentazione, attraverso la quale si conduce uno studio più approfondito e di dettaglio con lo scopo di definire un set di miscele tecnicamente valide e sostenibili da un punto di vista economico e ambientale. I materiali di base sono simili a quelli impiegati durante la pre-sperimentazione e forniti dallo stesso committente.

3.2.1 Pre-Sperimentazione

La pre-sperimentazione, come già esposto precedentemente, è la fase in cui sono definiti gli strumenti e le misure da adottare per raggiungere gli obiettivi prefissati (fase di sperimentazione).

Durante la fase di **pre-sperimentazione** (Fig. 3.1), si è proceduto ad una preliminare caratterizzazione dei materiali di base (RAP, sludge e sabbia) ad eccezione dell'emulsione bituminosa, a cui si rimanda alla scheda tecnica del prodotto per maggiori dettagli. Nello specifico, si analizza la distribuzione granulometrica, il contenuto di bitume del RAP e la massa volumica apparente (MVA) per ciascuna frazione solida. L'emulsione bituminosa è studiata solo da un punto di vista della composizione, ossia la valutazione della quantità di bitume dispersa nella fase acquosa.

Successivamente, si è passati allo studio del mix design degli aggregati combinando le frazioni di RAP, sludge e sabbia secondo il modello di Funk e Dinger. Come precedentemente illustrato, uno degli obiettivi del presente lavoro è quello di definire un set di miscele altamente lavorabili (con caratteristiche auto-compattanti e di fluidità). Per tale ragione, si è deciso di adottare suddetto modello, sebbene sia un classico approccio da calcestruzzo [12], che permette di combinare le differenti frazioni col fine di ottenere una miscela altamente lavorabile. Caratteristica fondamentale del modello di Funk e Dinger è il parametro di distribuzione "q": all'aumentare di "q", la frazione fine diminuisce rendendo la composizione litica della miscela più grossolana. Inoltre, aumentando il valore di "q", la curva granulometrica di progetto si orienta verso la condizione di massima densità, definita con il modello di Fuller per $n = 0.45$. Essendo nella fase di pre-sperimentazione e data la limitata disponibilità dei materiali, si è proceduto alla progettazione di due set di miscele (con e senza sabbia) fissando un solo valore del parametro di distribuzione "q", pari a 0.21. Choorackal et al. [12] suggeriscono

di adottare un valore di tale parametro compreso tra 0.21 e 0.25 per ottenere miscele ad elevata fluidità. Una miscela fluida è una miscela altamente lavorabile che, in virtù di questa caratteristica, può essere posta in opera in maniera agevole.

Attraverso il modello di Funk e Dinger (valore del parametro di distribuzione fisso e pari a 0.21), si definisce lo scheletro litico per due miscele: la prima formata da RAP, sludge e sabbia (Mix1-P) e la seconda costituita da RAP e sludge (Mix2-P). Il confronto tra le due miscele è realizzato in modo da osservare l'effetto dell'unico componente vergine a disposizione, ossia la sabbia.

Definita la composizione dello scheletro solido delle miscele Mix1-P e Mix2-P, si è proceduto alla definizione della fase fluida ottimale (Tabella 3.1).

La fase fluida ottimale è definita dalla somma del contenuto di emulsione bituminosa e di acqua di aggiunta. L'emulsione bituminosa è costituita da bitume disperso in acqua. In seguito al completamento del processo di rottura, avviene la separazione del bitume dall'acqua. Successivamente, durante il processo di presa, il bitume svolge la sua funzione di legante. L'acqua, invece, ha il compito di conferire lavorabilità alla miscela favorendone la compattazione. Allo scopo di definire la fase fluida ottimale si seguono due approcci: prova di spandimento e impiego della tavola a scosse.

Con la prova di spandimento, la fase fluida ottimale è quella che si ottiene in corrispondenza dello spandimento minimo. Lo spandimento assume un trend decrescente (all'aumentare del contenuto di acqua, aumenta il grado di coesione degli aggregati, quindi si riduce lo spandimento) fino al raggiungimento di un minimo, superato il quale lo spandimento aumenta (probabile azione di trascinarsi dell'acqua). È bene precisare che la prova di spandimento è realizzata impiegando acqua mentre la fase fluida ottimale delle miscele è costituita sia da acqua che da emulsione bituminosa. L'emulsione bituminosa, prima di rompere, si comporta da fluido come osservato da Grilli et al. [17]. È quindi possibile ritenere che l'effetto del fluido (acqua ed emulsione bituminosa) sullo spandimento sia analogo a quello della sola acqua. In virtù di tale osservazione è possibile condurre le prove di spandimento senza impiegare emulsione bituminosa ed estendere i risultati anche al caso con emulsione bituminosa.

La tavola a scosse permette di studiare le caratteristiche di addensamento di miscele di aggregati. Nella presente indagine, si è utilizzata la tavola a scosse per assestare miscele composte da differenti percentuali di RAP e sabbia (100:0, 50:50, 60:40, 70:30, 80:20, 0:100, RAP:sabbia, rispettivamente). Le caratteristiche di addensamento delle miscele oggetto della pre-sperimentazione (Mix1-P e Mix2-P) sono studiate attraverso i risultati ottenuti con la tavola a scosse, riproporzionando in volume le analoghe frazioni granulari (RAP e sabbia) di entrambe le miscele alla composizione delle miscele assestate con tavola a scosse. Analiticamente, si satura il volume di vuoti intergranulari dapprima introducendo la sludge e successivamente l'acqua (entrambe le componenti sono ricalcolate in volume). Tale contenuto di acqua è la fase fluida ottimale.

Come detto, la fase fluida ottimale è formata da acqua di aggiunta ed emulsione bituminosa: per tutte le miscele, quest'ultima componente è fissa e pari al 4 % sul peso degli aggregati secchi. Inoltre, per evidenziare l'effetto legante che sviluppa l'emulsione bituminosa, sono previste due tipologie di fasi fluide per le miscele Mix1-P e Mix2-P: la prima costituita da sola acqua e la seconda da emulsione bituminosa e acqua di aggiunta.

A questo punto, conoscendo la composizione dello scheletro solido seguendo il modello di Funk e Dinger e definite le fasi fluide ottimali tramite prova di spandimento e tavola a scosse, si è passati alla compattazione dei provini con la pressa a taglio girevole. La

fustella impiegata per la compattazione è caratterizzata da un piatto inferiore forato che permette il drenaggio in direzione verticale: in questo modo, si simula nel modo più rappresentativo l'operazione di compattazione realizzata in cantiere [17]. L'acqua drenata inferiormente viene raccolta in un bicchiere.

Per ciascuna miscela, attraverso i campioni compattati, si analizzano le caratteristiche di addensamento (in termini di auto-compattazione “ C_1 ” e lavorabilità “ k_{20} ”), volumetriche (contenuto di vuoti) e meccaniche (modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta “ITSM” e resistenza a trazione indiretta “ITS”). Per quanto concerne l'addensamento delle miscele, si è fatto riferimento alla lavorabilità “ k_{20} ” di ciascuna miscela con le diverse fasi fluide ottimali dalla ventesima rotazione in poi. Infatti, osservando le rette di lavorabilità, si nota un trend bilineare, il cui cambio di pendenza è intorno alla ventesima rotazione. Da un rilievo sperimentale condotto ad hoc, si nota che durante le prime venti rotazioni è drenata all'incirca il 50 % della fase fluida totale. Quindi, si ipotizza che con le prime venti rotazioni l'energia di compattazione è maggiormente spesa per il drenaggio dell'acqua e che la compattazione vera e propria si sviluppi da tale momento in poi.

In conclusione, la fase di pre-sperimentazione ha mostrato che:

- **Modello di Funk e Dinger ($q = 0.21$):** garantisce uno scheletro litico che si presta bene a raggiungere le caratteristiche di lavorabilità, garantendo un buon impacchettamento degli aggregati con conseguenze positive sulle caratteristiche meccaniche;
- **Fase fluida:** la prova di spandimento risulta un buon metodo per conferire lavorabilità e auto-compattazione alle miscele. Con la tavola a scosse si ottiene una fase fluida che non è sufficiente a garantire elevata auto-compattazione e lavorabilità e per questo motivo NON è impiegata nella fase di sperimentazione;
- **Emulsione bituminosa:** l'emulsione bituminosa (4 % sul peso di aggregati secchi) è necessaria per incrementare le performance meccaniche delle miscele poiché i campioni con sola acqua non soddisfano i requisiti meccanici. Nella sperimentazione tutte le miscele includono il 4 % di emulsione bituminosa;
- **Effetto della sabbia:** la miscela Mix1-P (con sabbia) raggiunge performance meccaniche migliori rispetto alla miscela Mix2-P (senza sabbia). Nella sperimentazione tutte le miscele includono la sabbia;
- **Pressa a taglio giratoria:** permette di catturare le variazioni di addensamento per ciascuna miscela al variare della fase fluida. La lavorabilità “ k_{20} ” è studiata dalla ventesima rotazione in poi;
- **ITSM e ITS:** permettono di definire le caratteristiche meccaniche delle miscele, al variare della composizione e della fase fluida.

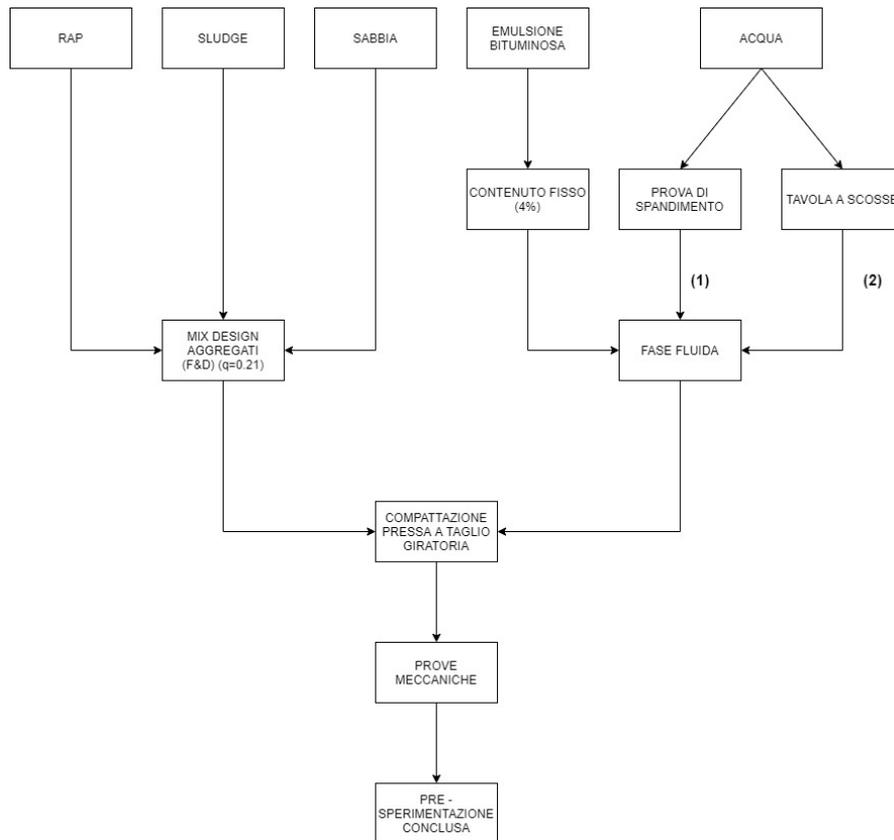


Fig. 3.1 Programma sperimentale – pre-sperimentazione

3.2.2 Sperimentazione

La sperimentazione è la seconda parte del programma sperimentale: la campagna di analisi è più accurata e dettagliata in modo da definire il set di miscele “ottime” che soddisfino gli obiettivi prefissati. Si conducono le analisi su nuove forniture di materiali. Volendo entrare nel merito della sperimentazione (Fig. 3.2), la caratterizzazione dei materiali base è del tutto analoga a quella messa in atto con la pre-sperimentazione.

Per quanto concerne la definizione dello scheletro solido, la prima miscela (Mix1-S) è formata da RAP, sludge e sabbia. Queste frazioni granulometriche sono combinate in modo da raggiungere la curva granulometrica di progetto, definita col modello di Funk e Dinger per $q = 0.21$. La fase fluida ottimale è definita attraverso la prova di spandimento e si sottolinea come il trend differisce rispetto alla pre-sperimentazione. Tra il tratto decrescente iniziale e il ramo crescente finale si interpone un plateau orizzontale in cui si registra spandimento nullo: ci sono quindi due punti di minimo, a cui corrispondono due fasi fluide ottime.

Quindi, per il Mix1-S (Tabella 3.1) si confezionano dei provini cilindrici con le due rispettive fasi fluide ottime, ripartite col 4 % di emulsione bituminosa e la restante parte acqua di aggiunta. Le analisi delle caratteristiche di addensamento, volumetriche e meccaniche, seguendo lo stesso approccio adottato con la pre-sperimentazione, forniscono risultati di gran lunga inferiori rispetto alla pre-sperimentazione. Probabilmente, tali risultati sono imputabili alle variazioni granulometriche dei materiali (in particolare la sludge) che combinati insieme, forniscono dei dosaggi relativi

totalmente differenti, sebbene la curva granulometrica di progetto tra le due fasi rimanga invariata.

Per tale ragione, si è deciso di svincolarsi momentaneamente dal modello di Funk e Dinger, ricostruendo con i materiali della sperimentazione la miscela Mix1-P, indicata in questa fase come Mix2-S. A seguire, si definiscono altre due miscele (Mix3-S e Mix4-S) incrementando il contenuto di RAP a step del 5 % e mantenendo costante il rapporto tra sludge e sabbia pari a 2.5. Si aumenta il contenuto di RAP in modo da garantire una struttura litica più robusta. Le miscele Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S così definite possono essere retro-calcolate con il modello di Funk e Dinger: si nota che all'aumentare del tenore di RAP, aumenta il fattore di distribuzione "q", che a questo punto non è più un parametro di progetto ma un indicatore di stato. Inoltre, all'aumentare di "q" si tende alla condizione di massimo addensamento definita col modello di Fuller per $n = 0.45$.

Analogamente a quanto già discusso, la fase fluida ottimale è definita attraverso la prova di spandimento: per ciascuna delle tre miscele (Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S) si osserva un plateau orizzontale, a cui corrispondono due differenti valori di fase fluida ottimale (da ripartire col 4 % di emulsione bituminosa e acqua di aggiunta).

Quindi, conoscendo la composizione granulometrica di ogni miscela e le rispettive fasi fluide, si confezionano dei provini alla pressa a taglio giratoria per asserire le caratteristiche di addensamento, volumetriche e meccaniche. Tale caratterizzazione segue gli stessi step definiti con la pre-sperimentazione. Gli incoraggianti risultati ottenuti in termini di contenuto di vuoti, modulo di rigidezza e resistenza a trazione indiretta hanno fornito indicazioni utili per stabilire quali miscele confezionare per la valutazione della resistenza all'ormaiamento.

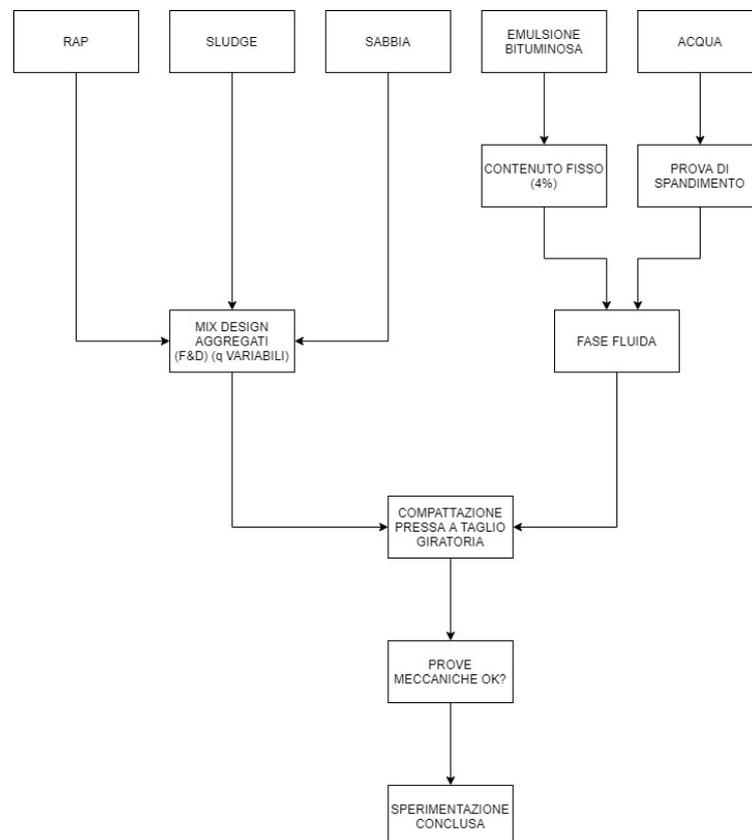


Fig. 3.2 Programma sperimentale – sperimentazione

3.3 Nomenclatura delle miscele

Le miscele analizzate durante l'intera campagna sperimentale sono rappresentate dalla seguente nomenclatura, a cui dovranno riferirsi i risultati e confronti riportati nei capitoli successivi:

Mix1-X-Y-Z

dove,

X, uguale a "P" nel caso di una miscela impiegata durante la pre-sperimentazione o "S" nel caso di una miscela impiegata durante la sperimentazione;

Y, indica il contenuto di acqua, espresso in percentuale (%) sul peso di aggregato secco (per aggregato si intende lo scheletro solido, formato da RAP, Sabbia e Sludge). Per alcune miscele della pre-sperimentazione si è utilizzata solo acqua: la lettera A, preceduta da un valore numerico, indica il contenuto di acqua sul peso di aggregato secco (ad esempio, Mix1-P-5A-200, indica che la miscela Mix1 è prodotta solo con acqua e senza emulsione bituminosa);

Z, indica il numero di rotazioni utilizzate per compattare il campione. Per i campioni della sperimentazione il valore di C è omesso poiché tutti sono stati compattati con 100 rotazioni.

Tabella 3.1 Nomenclatura campioni

| ID (-) | RAP (%) | Sludge (%) | Sabbia (%) | X (-) | Y (-) | Z (-) |
|-----------------|------------|---------------|---------------|----------|----------|----------|
| Mix1-P-5A-200 | 65 | 25 | 10 | P | 5.00 | 200 |
| Mix1-P-20A-100 | 65 | 25 | 10 | P | 20.0 | 100 |
| Mix1-P-4A1E-200 | 65 | 25 | 10 | P | 4.00 | 200 |
| Mix1-P-5-200 | 65 | 25 | 10 | P | 5.00 | 200 |
| Mix1-P-16-200 | 65 | 25 | 10 | P | 16.0 | 200 |
| Mix2-P-4A-200 | 70 | 30 | - | P | 4.00 | 200 |
| Mix2-P-18A-200 | 70 | 30 | - | P | 18.0 | 200 |
| Mix2-P-14-200 | 70 | 30 | - | P | 14.0 | 200 |
| Mix1-S-11 | 52 | 31 | 17 | S | 11.0 | 100 |
| Mix1-S-15 | 52 | 31 | 17 | S | 15.0 | 100 |
| Mix2-S-13.5 | 65 | 25 | 10 | S | 13.5 | 100 |
| Mix2-S-16 | 65 | 25 | 10 | S | 16.0 | 100 |
| Mix3-S-13.5 | 70 | 21 | 9 | S | 13.5 | 100 |
| Mix3-S-16 | 70 | 21 | 9 | S | 16.0 | 100 |
| Mix4-S-10.5 | 75 | 18 | 7 | S | 10.5 | 100 |
| Mix4-S-13.5 | 75 | 18 | 7 | S | 13.5 | 100 |

4 Materiali e metodi di prova

Lo studio e la definizione di un set di miscele innovative, prodotte con tecnologia a freddo e composte da elevati tenori di materiali riciclati, ha richiesto la definizione del programma sperimentale illustrato nel capitolo 3.

Il programma sperimentale è lo strumento attraverso il quale perseguire gli obiettivi definiti nel presente progetto: realizzare set di miscele che presentano caratteristiche di sostenibilità ambientale ed economica, congiunte ad elevate performance meccaniche.

Uno degli aspetti che conferisce originalità al presente lavoro di tesi risiede nell'utilizzo di strumenti inconsueti per quanto concerne la progettazione delle miscele bituminose prodotte con tecnologia a "freddo". In virtù di tale aspetto, il programma sperimentale è diviso in pre-sperimentazione e sperimentazione.

Nella fase di pre-sperimentazione si realizza una calibrazione degli strumenti e dei protocolli di prova da utilizzare durante la sperimentazione, ossia la fase finale del lavoro con la quale perseguire gli obiettivi prefissati.

Nel presente capitolo vengono trattate le caratteristiche dei materiali impiegati durante tutta la campagna sperimentale. Nella fattispecie si riportano per ogni tipo di aggregato la curva granulometrica e la massima massa volumica teorica. Per il RAP, oltre alla consueta curva granulometrica (denominata anche "curva nera"), si riporta la curva granulometrica degli aggregati estratti ("curva bianca") e il contenuto di legante.

Inoltre, all'interno dello stesso capitolo si riportano le prove e le modalità con le quali esse devono essere realizzate in modo tale da progettare preliminarmente le miscele e raggiungere gli obiettivi prefissati.

4.1 Caratterizzazione fresato bituminoso

Il fresato bituminoso, come già detto precedentemente, è una miscela costituita da aggregati e bitume invecchiato, ottenuto in seguito a operazioni di fresatura di pavimentazioni stradali ammalorate. Il fresato bituminoso utilizzato in tutte le fasi del presente lavoro è fornito da un'impresa locale, che gestisce e manutiene un tratto autostradale situato nel nord-ovest italiano. Affinché il materiale possa essere caratterizzato, è necessario individuarne la curva granulometrica (curva granulometrica nera, realizzata sul RAP tal quale; curva granulometrica bianca, realizzata sugli aggregati estratti), il contenuto di legante e la massa volumica apparente.

Definizione di un campione rappresentativo

Data l'elevata variabilità che può essere riscontrata nel RAP, è necessario effettuare la caratterizzazione del materiale su un campione correttamente definito in modo tale che le caratteristiche che ne derivano possano essere rappresentative dell'intero lotto. La procedura di campionamento e la riduzione a campione sono disciplinati dalla norma UNI EN 932-1. La norma di riferimento definisce, mediante l'equazione (4.1) in funzione del diametro massimo dell'aggregato (D , espresso in mm) e della massa volumica in mucchio (ρ_b , espresso in Mg/m^3), il peso minimo del campione globale (M , espresso in kg). Mediante il processo di riduzione a campioni si definisce un campione di laboratorio.

$$M = 6 \cdot \sqrt{D} \cdot \rho_b \quad (4.1)$$

Il campione globale, secondo la UNI EN 932-1, è un'aggregazione di materiale prelevato da un lotto con una operazione dell'apparecchiatura di campionamento. La stessa norma definisce il campione di laboratorio come un campione ridotto derivato da un campione globale per prove di laboratorio. Tra le diverse procedure di riduzione contemplate dalla norma, quella che è stata messa in atto per il RAP è la “Riduzione di un campione globale a mezzo di un riduttore a scomparti” (Fig. 4.1).



Fig. 4.1 Divisore a scomparti

L'operazione richiede una prima miscelazione del campione globale e il successivo versamento del materiale lungo la linea mediana del riduttore. A partire dal campione globale, si ottengono due nuovi campioni che si trovano all'interno dei due scomparti posti alla base del divisore. Uno dei due campioni viene escluso, mentre l'altro viene nuovamente distribuito lungo la linea mediana e successivamente ridotto in ulteriori due porzioni. Il procedimento continua fino a quando non si ottiene un campione della quantità richiesta. Ottenuto il campione di laboratorio, è possibile procedere con la caratterizzazione e successivamente estendere le caratteristiche determinate all'intero lotto.

4.1.1 Distribuzione granulometrica fresato bituminoso

Oltre ad essere una operazione di caratterizzazione degli aggregati, la determinazione della distribuzione granulometrica è propedeutica per la fase di ottimizzazione in cui vengono individuate le frazioni di RAP, sludge e sabbia che combinate minimizzano gli scarti con la curva granulometrica di progetto (Funk e Dinger).

La distribuzione granulometrica degli aggregati è realizzata utilizzando dei setacci che presentano delle maglie quadrate. L'ampiezza delle maglie dei setacci impiegati nella prova di caratterizzazione, in accordo alla norma UNI EN 13108-8, sono: 12.5 mm, 10 mm, 8 mm, 6.3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm e 0.063 mm.

La quantità di materiale da analizzare è definita in accordo alla norma UNI EN 933-1 in funzione del diametro massimo dell'aggregato (nel caso in questione 12.5 mm) ed è riportato in Tabella 4.1. Nella fattispecie, la massa della porzione di prova è pari a circa 2 kg.

Tabella 4.1 Massa minima della porzione di prova per aggregati di massa volumica normale

| D_{MAX} (mm) | M_{MIN} (kg) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 63 | 40 |
| 32 | 10 |
| 16 | 2.6 |
| 8 | 0.6 |
| ≤ 4 | 0.2 |

La setacciatura è eseguita per mezzo di un setacciatore elettromeccanico ad impulsi e la durata dell'azione vibrante applicata dal setacciatore è pari a 10 minuti. Al termine della setacciatura, si rileva il peso lordo dei setacci (setaccio + materiale). Noto il peso di ciascun setaccio, è possibile calcolare il trattenuto netto dal quale ottenere il passante progressivo e infine la curva granulometrica. La curva granulometrica si ottiene diagrammando i passanti percentuali (%P, sulle ordinate) e i relativi diametri (D in mm, in scala logaritmica sulle ascisse). Si ottengono così le curve granulometriche del RAP tal quale impiegato durante la pre-sperimentazione e la sperimentazione.

Definita la curva nera (RAP tal quale), si procede alla valutazione della curva bianca, ossia la distribuzione granulometrica degli aggregati estratti tramite processo di ignizione. Come verrà illustrato nel seguito, il processo di ignizione permette di definire il contenuto di legante bituminoso all'interno del RAP.

Prima di eseguire la setacciatura, gli aggregati estratti sono soggetti ad un preventivo lavaggio in modo da allontanare la frazione di materiale passante al setaccio 0.063 mm: tale frazione verrà poi calcolata per differenza di peso (pre-lavaggio e post-lavaggio) e computata per la definizione della granulometria. Come indicato nella norma UNI EN 933-1, sono utilizzati due setacci (2 mm e 0.063 mm) ed il lavaggio continua fino a quando l'acqua uscente dal setaccio inferiore risulta limpida. Il materiale umido è essiccato in stufa a 105°C fino al raggiungimento di massa costante. Di conseguenza, gli aggregati secchi sono setacciati seguendo il procedimento precedentemente illustrato: si definisce, quindi, la curva bianca, ossia la distribuzione granulometrica degli aggregati estratti dal RAP tal quale.

In Fig. 4.2, si riportano le curve nere (RAP tal quale) e bianche (aggregati estratti) del fresato bituminoso utilizzato durante la pre-sperimentazione e la sperimentazione. Come c'è da aspettarsi, la curva nera è disposta più in basso rispetto alla curva bianca: infatti, il RAP si presenta in forma più grossolana, essendo l'agglomerazione di tante particelle legate tra di loro dal bitume. A seguito del processo di ignizione, il legame tra le particelle viene rimosso e di conseguenza il cluster di RAP si trasformerà in un certo numero di aggregati molto più fini.

Il fresato bituminoso utilizzato nelle due fasi della campagna sperimentale presenta piccole differenze, in termine di passante progressivo, tra i setacci 8 mm e 1 mm. Sebbene di modesto impatto rispetto alle altre frazioni granulari, le differenze nella composizione finale delle ricette tra pre-sperimentazione e sperimentazione portano in conto anche dette differenze. Informazioni ulteriori sono fornite tramite l'allegato I.

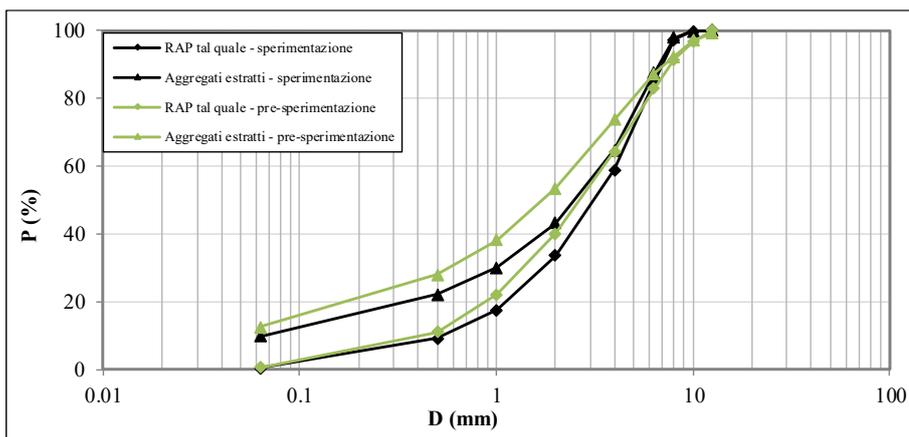


Fig. 4.2 Granulometria RAP tal quale e aggregati estratti

Contenuto di legante

Il contenuto di bitume presente nel fresato bituminoso viene determinato tramite ignizione. La norma che disciplina tale procedura è la UNI EN 12697-39 e lo strumento impiegato è la carbolite (Fig. 4.3).



Fig. 4.3 Carbolite

Il peso minimo del campione da sottoporre alla prova (Tabella 4.2) è definito dalla norma di riferimento in funzione del diametro massimo dell'aggregato (nella fattispecie 12.5 mm).

Tabella 4.2 Dimensione del campione di prova

| D_{MAX} (mm) | M_{MIN} (g) |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 4 | da 1000 a 1400 |
| 5.6-6.3-8-10 | da 1000 a 1600 |
| 11.2-12.5-14-16 | da 1000 a 1700 |
| 20-22.4 | da 1000 a 2400 |
| 31.5 | da 1000 a 3000 |
| 40-45 | da 1000 a 4000 |

La prova consiste nell'inserire all'interno della carbolite un cestello d'acciaio costituito da due ripiani, al di sopra dei quali il materiale (pari a circa un kilogrammo, in accordo con la norma di riferimento), separato in due frazioni più o meno uguali, viene uniformemente distribuito. La temperatura di prova è pari a 540°C. All'interno del forno avviene il processo di combustione, che continua fino a quando la bilancia non registra più variazioni di peso segnalandone la completa estrazione del bitume e la fine del processo.

Terminato il processo di estrazione, il campione viene lasciato raffreddare e successivamente pesato. Conoscendo il peso del campione (prima e dopo il processo di ignizione), è possibile determinare la percentuale di bitume sul peso della miscela di RAP e degli aggregati estratti mediante l'equazione (4.2) e l'equazione (4.3), rispettivamente.

$$\%B_{RAP} = \frac{(M_i - T) - (M_f - T)}{(M_f - T)} \quad (4.2)$$

$$\%B_{agg} = \frac{(M_i - T) - (M_f - T)}{(M_i - T)} \quad (4.3)$$

Dove:

- M_i è il peso lordo del campione prima della combustione;
- M_f è il peso lordo del campione dopo la combustione;
- T è il peso del cestello d'acciaio.

Le prove sul contenuto di legante effettuate sul RAP hanno evidenziato i risultati riportati in Tabella 4.3. Informazioni ulteriori sono fornite tramite l'allegato I.

Tabella 4.3 Contenuto di legante medio

| | B_{RAP} (%) | B_{agg} (%) |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Pre – sperimentazione | 6.59 | 7.06 |
| Sperimentazione | 5.28 | 5.58 |

Il contenuto di bitume nel RAP utilizzato durante la pre-sperimentazione è maggiore rispetto a quello impiegato durante la sperimentazione.

4.1.2 Determinazione MVA fresato bituminoso

La norma di riferimento UNI EN 1097-6 propone la seguente definizione della massa volumica apparente: “rapporto tra la massa del campione di aggregato essiccato e il suo volume occupato in acqua, compreso ogni vuoto interno non accessibile ma esclusi i pori accessibili all'acqua”.

La prova richiede l'utilizzo di picnometri e dei relativi tappi che devono essere inizialmente pesati. Secondo la norma di riferimento, la quantità di materiale impiegata per la prova è determinata in funzione del diametro massimo dell'aggregato (nella fattispecie circa 1.3 kg). Innanzitutto, si suddivide il materiale manualmente in due parti

in modo da ottenere caratteristiche uniformi. Si versa il materiale all'interno dei picnometri e si effettua una nuova pesatura.

Successivamente, all'interno dei picnometri viene inserita acqua distillata in quantità tale da ricoprire adeguatamente il materiale. I picnometri vengono collegati a una macchina che ne permette la realizzazione del vuoto. Alcune fasi della prova sono riportate in (Fig. 4.4)



Fig. 4.4 Picnometro con materiale (a) e fase di disaerazione (b)

Per facilitare il processo di disaerazione è possibile scuotere i picnometri facendo particolare attenzione. Il processo di disaerazione può ritenersi concluso quando non sono più visibili bolle d'aria. Terminato il processo di disaerazione, i picnometri vengono completamente riempiti con acqua disaerata fino all'orlo e successivamente pesati.

Noti tutti i parametri, è possibile calcolare la massa volumica apparente con l'equazione (4.4).

$$\rho_{mw} = \frac{(M_2 - M_1)}{V - \frac{(M_3 - M_2)}{\rho_w}} \quad (4.4)$$

Dove:

- M_1 è la massa del picnometro con il tappo, in grammi;
- M_2 è la massa del picnometro, tappo e il campione di prova, in grammi;
- M_3 è la massa del picnometro, tappo, campione di prova e acqua, in grammi;
- V è il volume del picnometro, in centimetri cubi;
- ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova, in grammi per centimetri cubi.

I valori medi di massa volumica apparente per il RAP utilizzato durante pre-sperimentazione e sperimentazione sono riportati in Tabella 4.4.

Tabella 4.4 Valori medi ρ_{mw} per il RAP

| | ρ_{mw} (kg/m ³) |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Pre - sperimentazione | 2468 |
| Sperimentazione | 2562 |

4.2 Caratterizzazione sludge

La caratterizzazione della sludge richiede la determinazione della curva granulometrica e della massa volumica apparente. Affinché possa esserne effettuata la caratterizzazione, è necessario definire un campione rappresentativo che viene individuato in modo parzialmente analogo a quanto descritto nel paragrafo 4.1. A differenza del processo di riduzione utilizzato per il RAP, nel caso in questione si è proceduto con una quartatura manuale (Fig. 4.5).



Fig. 4.5 Suddivisione del campione in quattro parti (a) e esclusione di due parti opposte (b)

La norma di riferimento, come nel caso del RAP, è la UNI EN 932-2. Il campione globale è stato posto sul piano di lavoro e successivamente miscelato a fondo e ammassato in modo da ottenere una forma conica. Tale operazione viene ripetuta almeno tre volte. Successivamente il cono viene appiattito in modo da formare uno strato uniforme. Dopo la formazione di tale strato, il campione è stato suddiviso in quattro parti uguali mediante due diagonali perpendicolari. Due parti opposte vengono scartate mentre le altre due vengono nuovamente ammassate in modo da ripetere il processo di quartatura che continua fino a quando non si ottiene un campione ridotto della dimensione desiderata.

4.2.1 Distribuzione granulometrica sludge

La curva granulometrica della sludge è ottenuta mediante la procedura utilizzata per definire la granulometria degli aggregati estratti dal RAP (paragrafo 4.1.1).

La norma UNI EN 933-1 richiede il lavaggio del campione in modo tale da sottoporre il trattenuto al setaccio 0.063 mm all'analisi granulometrica mediante setacciatura che, nel caso in questione, è stata effettuata a mano. Data la granulometria più fine, sono stati aggiunti dei setacci con ampiezza delle maglie comprese tra 0.5 mm e 0.063 mm in modo da avere un'accuratezza maggiore (setacci 0.25 mm e 0.125 mm).

I setacci utilizzati sono: 8 mm, 6.3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm e 0.063 mm. L'ampiezza dei setacci è differente rispetto a quella adottata per il RAP poiché la sludge, a differenza del fresato bituminoso, è un aggregato e la sua granulometria è disciplinata dalla norma UNI EN 933-1. Il peso del campione di prova, in funzione del diametro massimo dell'aggregato, è pari a circa 450 grammi.

La curva granulometrica della sludge (Fig. 4.6) impiegata durante la pre-sperimentazione era già stata determinata in passato per altri progetti di ricerca. Durante la sperimentazione, la granulometria della sludge (Fig. 4.6) è determinata sia - dopo lavaggio con la procedura descritta precedentemente (caratterizzazione “umida”) sia a “secco”.

È bene precisare che la norma di riferimento (UNI EN 933-1) richiede la caratterizzazione “umida” e quindi con lavaggio degli aggregati.

Il confronto tra le granulometrie della sludge (Fig. 4.6) caratterizzata per via umida durante la pre-sperimentazione e durante la sperimentazione mostra come quest’ultima risulti notevolmente più grossolana. Tali risultati influiscono successivamente sul mix design e quindi sulle ricette della pre-sperimentazione e della sperimentazione che saranno differenti.

Ulteriormente, confrontando le curve granulometriche della sludge impiegata durante la sperimentazione caratterizzata per via secca e per via umida, si vede che la modalità con la quale la granulometria è stata ottenuta influisce sul risultato finale. Informazioni ulteriori sono fornite tramite l’allegato I.

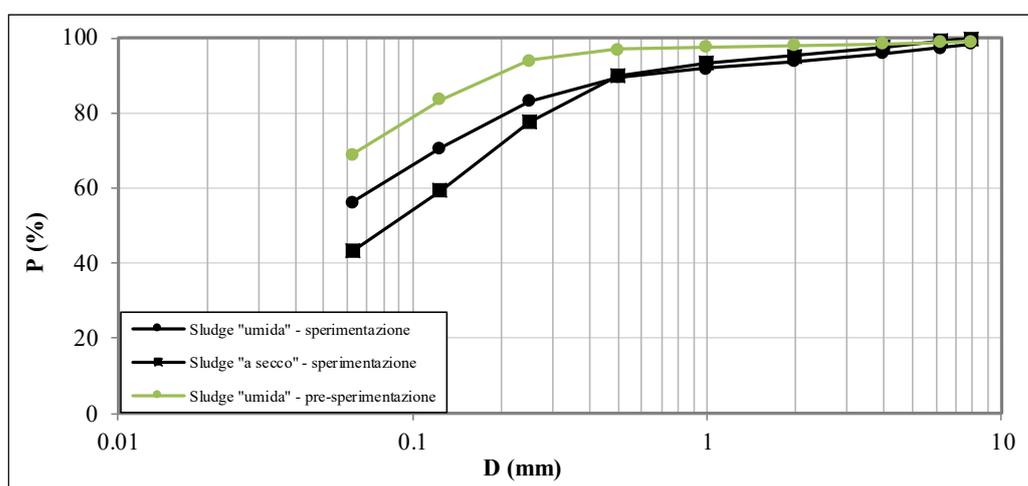


Fig. 4.6 Granulometria sludge

4.2.2 Determinazione MVA sludge

La norma che disciplina le modalità di determinazione della massa volumica apparente degli aggregati è la UNI EN 1097-6. Sostanzialmente, il procedimento è identico a quello utilizzato per il RAP e descritto nel paragrafo 4.1.2. La norma di riferimento stabilisce, in funzione del diametro massimo dell’aggregato, il peso minimo del campione di prova che nella fattispecie è pari a 490 grammi. I valori medi di massa volumica apparente della sludge usata durante la pre-sperimentazione e la sperimentazione sono riportati in Tabella 4.5.

Tabella 4.5 Valori medi di ρ_{mw} per la sludge

| | ρ_{mw} (kg/m^3) |
|-----------------------|------------------------------------|
| Pre – sperimentazione | 2810 |
| Sperimentazione | 2819 |

4.3 Caratterizzazione sabbia

La procedura di caratterizzazione della sabbia è quasi completamente analoga a quella adottata per la sludge. Ai fini della caratterizzazione è necessaria la definizione della curva granulometrica (UNI EN 933-2) e della massa volumica apparente (UNI EN 1097-6). La definizione di queste caratteristiche deve essere effettuata su un campione rappresentativo individuato mediante il processo di riduzione a campione descritto nel paragrafo 4.1 (UNI EN 932-1).

4.3.1 Distribuzione granulometrica sabbia

La curva granulometrica della sabbia è ottenuta mediante la procedura utilizzata per definire la granulometria per via umida della sludge (paragrafo 4.2.1). A differenza di quanto effettuato per la sludge, il trattenuto al setaccio 0.063 mm è stato poi setacciato utilizzando il setacciatore senza ricorrere invece alla setacciatura a mano. In accordo con la norma UNI EN 933-2, i setacci utilizzati sono: 8 mm, 6.3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm e 0.063 mm. Il peso del campione di prova, definito in funzione del diametro massimo dell'aggregato in accordo con la norma di riferimento è pari a circa 1.4 kg.

La curva granulometrica della sabbia impiegata durante la pre-sperimentazione era già stata determinata in passato per altri progetti di ricerca. Essa è riportata insieme alla curva granulometrica della sabbia utilizzata durante la sperimentazione in Fig. 4.7. In termini di passante progressivo, tra i setacci 0.5 mm e 0.063 mm, le curve si discostano indicando che la sabbia impiegata durante la pre-sperimentazione risulta più fine rispetto a quella della sperimentazione. Sebbene le differenze non siano marcate, queste influiscono sulla composizione finale delle ricette della pre-sperimentazione e della sperimentazione.

Informazioni ulteriori sono fornite tramite l'allegato I.

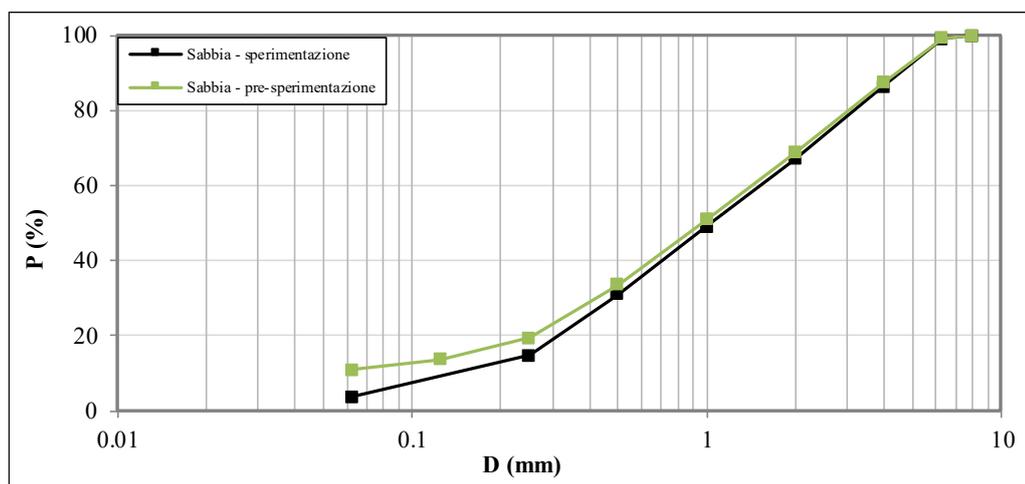


Fig. 4.7 Granulometria sabbia

4.3.2 Determinazione MVA sabbia

La norma che disciplina le modalità di determinazione della massa volumica apparente degli aggregati è la UNI EN 1097-6. Il procedimento adottato è analogo a quello impiegato per il RAP e descritto nel paragrafo 4.1.2. Il campione di prova, definito in accordo alla normativa di riferimento, è pari a 1.5 kg. In Tabella 4.6 si riportano i valori medi di massa volumica apparente per la sabbia impiegata durante la pre-sperimentazione e sperimentazione.

Tabella 4.6 Valori medi di ρ_{mw} per la sabbia

| | ρ_{mw} (kg/m ³) |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Pre – sperimentazione | 2746 |
| Sperimentazione | 2757 |

4.4 Emulsione bituminosa

L'emulsione bituminosa è una dispersione di due prodotti insolubili l'uno dall'altro: l'acqua e il legante bituminoso. L'emulsione bituminosa utilizzata è di tipo cationico e viene impiegata per mano d'attacco nella costruzione e manutenzione di strade, autostrade e piste aeroportuali. Le caratteristiche dichiarate dal produttore sono illustrate in Tabella 4.7.

Tabella 4.7 Caratteristiche emulsione bituminosa

| Caratteristica essenziale | Unità di misura | Norma di riferimento | Classe dichiarata | Valori di riferimento |
|---|-----------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| Contenuto di legante (per differenza contenuto d'acqua) | % | UNI EN 1428 | Classe 5 | 53-57 |
| Indice di rottura | Indice | UNI EN 13075-1 | Classe 3 | 70-155 |
| Viscosità a 40°C (foro da 2 mm) | sec | UNI EN 12846 | Classe 3 | 15-70 |
| Residuo al setaccio 0.5 mm | % | UNI EN 1429 | Classe 2 | ≤ 0.1 |
| Tendenza alla sedimentazione (7 giorni di stoccaggio) | % | UNI EN 1429 | Classe 4 | ≤ 0.5 |
| Grado di acidità (PH) | / | UNI EN 12850 | 7 | 2-4 |
| Legante recuperato per evaporazione (UNI EN 13074) | | | | |
| Consistenza alle temperature intermedie di esercizio: Penetrazione a 25° C | 0.1 mm | UNI EN 1426 | Classe 3 | ≤ 100 |
| Consistenza alle temperature elevate di esercizio: Punto di rammollimento | ° C | UNI EN 1427 | Classe 6 | ≥ 43 |
| Fragilità alle basse temperature di esercizio: Punto di rottura Fraass | ° C | UNI EN 12593 | Classe 5 | ≤ -10 |

Nella presente sperimentazione, l'emulsione bituminosa è caratterizzata solo da un punto di vista della composizione, ossia la definizione del contenuto di bitume e di acqua. Sebbene sia di primaria importanza conoscere le caratteristiche sia del bitume che dell'intera emulsione bituminosa, nel presente lavoro si è preferito tralasciare la suddetta analisi in virtù di uno studio più approfondito delle miscele.

Per verificare l'effettivo contenuto di legante bituminoso, alcuni campioni di emulsione bituminosa sono stati pesati e successivamente posti in stufa a 40 °C fino al raggiungimento di massa costante. La condizione di massa costante indica l'evaporazione completa dell'acqua. La differenza di peso tra i campioni prima e dopo l'evaporazione, indica la quantità d'acqua contenuta nell'emulsione bituminosa, pari al 63.4%. Di conseguenza, il contenuto di legante è risultato pari al 36.6 %.

Il valore ottenuto è sensibilmente minore rispetto a quanto dichiarato dal produttore (53%-57%).

Nel presente lavoro di tesi, per tutte le miscele studiate, sia nella pre-sperimentazione che nella sperimentazione, l'emulsione bituminosa è dosata in ragione del 4% sul peso complessivo di frazione solida (RAP, sludge e sabbia). Si è ritenuto opportuno impiegare suddetto dosaggio per ragioni economiche. L'unico legante impiegato è il bitume contenuto nell'emulsione. Secondo la classificazione riportata in Fig. 4.8, le miscele progettate nel presente lavoro possono essere definite "miscele stabilizzate con bitume". A differenza dei conglomerati bituminosi tradizionali (solitamente costituiti da un elevato contenuto di bitume e basso o nullo contenuto di cemento), le miscele in questione presentano un basso contenuto di bitume. Il basso contenuto di bitume implica una minore resistenza delle miscele con effetti negativi sulle performance meccaniche.

Sebbene le performance meccaniche delle miscele stabilizzate a bitume risultino inferiori rispetto a quelle tradizionali, è necessario tenere in considerazione il risparmio economico derivante dall'impiego di minore quantità di legante all'interno delle miscele.

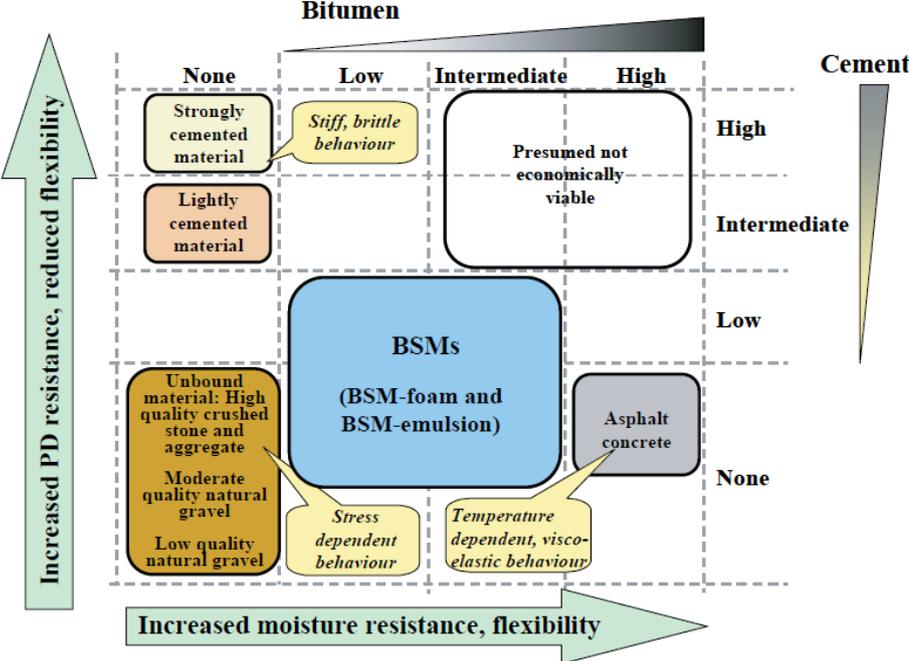


Fig. 4.8 Comportamento concettuale dei materiali della pavimentazione [18]

4.5 Il modello di Funk e Dinger per la definizione dello scheletro litico delle miscele

Uno dei modelli più impiegati per definire la curva granulometrica di progetto è il modello di Fuller, rappresentato dall'Eq.(4.5).

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (4.5)$$

Dove:

- P (D) è il passante percentuale al setaccio D (%);
- D è il diametro in corrispondenza del quale si vuole definire il passante (mm);
- D_{max} è il diametro massimo delle particelle all'interno della miscela (mm);
- q è il parametro di distribuzione (-).

Attraverso il modello in questione si rappresenta la condizione di massimo addensamento. È bene precisare che le caratteristiche di addensamento degli aggregati non legati possono essere differenti rispetto a quelle degli stessi aggregati combinati con acqua e legante [19]. Il comportamento sopracitato dipende dal modo in cui il legante riempie i vuoti intergranulari.

Nel caso della curva di Fuller, il parametro di distribuzione “q” vale 0.5 e 0.45 per miscele cementizie e bituminose, rispettivamente. Il parametro di distribuzione definisce il bilanciamento tra la frazione fine e quella grossolana degli aggregati all'interno dello scheletro litico. Valori maggiori del parametro q diminuiscono la quantità di fine.

Nel 1930, Anderson & Andreasen provarono a migliorare il modello di Fuller proponendo un valore del parametro di distribuzione tra 0.33 e 0.5. La diminuzione del parametro di distribuzione incrementa la frazione fine della miscela con conseguente riempimento dei vuoti tra le particelle. Nel 1980, Funk e Dinger modificarono il modello di Anderson & Andreasen in modo tale che la distribuzione in questione avesse un diametro limite inferiore ponendo l'attenzione sia sulla frazione grossolana che su quella fine [19]. Il modello di Funk e Dinger, anche conosciuto come modello di Anderson & Andreasen modificato, è riportato attraverso l'Eq. (4.6):

$$P(D) = 100 \cdot \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (4.6)$$

Dove:

- P (D) è il passante percentuale al setaccio D (%);
- D è il diametro in corrispondenza del quale si vuole definire il passante (mm);
- D_{min} è il diametro minimo delle particelle all'interno della miscela (mm);
- D_{max} è il diametro massimo delle particelle all'interno della miscela (mm);
- q è il parametro di distribuzione (adimensionale).

Come già anticipato, uno degli obiettivi della presente indagine sperimentale è quello di definire miscele con caratteristica di elevata lavorabilità. È, altresì, da tenere in considerazione che per i materiali impiegati per le pavimentazioni stradali (ad eccezione delle miscele cementizie, impiegate per lo più in strati di fondazione) è una caratteristica non convenzionale. Per tale ragione, si è ricorso a metodi e procedure che rientrano nel settore dei calcestruzzi, discostandosi dal classico approccio da conglomerato bituminoso (nel caso in questione, miscele bituminose riciclate a freddo).

In conclusione, per la definizione dello scheletro litico delle miscele studiate sia nella pre-sperimentazione che nella sperimentazione si è scelto di utilizzare il modello di Funk e Dinger, solitamente impiegato per la definizione dello scheletro solido di miscele cementizie fluide e auto-compattanti [12]. Ancora una volta, si rimarca l'interesse alla definizione di miscele altamente lavorabili, essendo non comune definire fluide e auto-compattanti le miscele bituminose riciclate a freddo.

Operativamente, è necessario innanzitutto fissare i parametri D_{max} e D_{min} della curva di Funk e Denger:

- D_{max} è pari a 12.5 mm;
- D_{min} è pari a 0.005 mm.

Nella fase di pre-sperimentazione, ossia il luogo in cui si definiscono gli strumenti e si mettono a punto tutti i protocolli di analisi da adottare nella sperimentazione, e data la limitata disponibilità dei materiali, si è proceduto alla progettazione di due miscele (Mix1-P e Mix2-P) fissando un solo valore del parametro di distribuzione “q” (nella fattispecie $q=0.21$). Choorackal et al. [12] suggeriscono di adottare un valore di tale parametro compreso tra 0.21 e 0.25 per ottenere miscele ad elevata fluidità. Durante la pre-sperimentazione, si è ritenuto opportuno adottare un solo valore del parametro di distribuzione ($q = 0.21$) in primo luogo per comprendere la possibilità di utilizzare a pieno il modello di Funk e Dinger e in secondo luogo per motivi di natura tecnica (limitatezza dei materiali a disposizione). Le successive analisi volumetriche e meccaniche hanno confermato che lo scheletro litico così definito fornisce un interessante struttura, che ben si presta a rispondere alle sollecitazioni meccaniche (sia statiche che dinamiche).

Nel corso della sperimentazione si è inizialmente seguito l'approccio appena definito, combinando le differenti frazioni granulometriche con il modello di Funk e Dinger, con valore del parametro di distribuzione “q” pari a 0.21. Analizzando le caratteristiche di addensamento, volumetriche e meccaniche della miscela ottenuta (Mix1-S) si denota una miscela eccessivamente aperta e con performance meccaniche insufficienti. La principale causa è da imputare al valore del parametro “q”: infatti, per “q” uguale a 0.21, si include troppa frazione fine (in particolare la sludge) che rende la miscela eccessivamente aperta. Quest'ultima considerazione trova fondamento nel fatto che la frazione fine controlla la capacità di ritenzione dell'acqua nella miscela che, una volta allontanata tramite evaporazione, si trasforma in vuoti intergranulari. In altre parole, all'aumento del fattore “q”, aumenta la frazione fine che trattiene elevati contenuti di acqua, la quale genererà elevati teneri di vuoti una volta che la miscela è in condizioni asciutte.

Come si vedrà nel seguito, le altre miscele studiate nella sperimentazione (Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S) sono composte da quantità di RAP crescenti e rapporto tra sludge e sabbia costante. Le composizioni di tali miscele non sono ottenute con il modello di Funk e Dinger ma, a partire dal Mix1-P, si è incrementato il RAP a step del 5 %, mantenendo il contenuto di sludge pari a 2.5 quello della sabbia. A questo punto, ritornando al modello granulometrico in questione, si retrocalcolano le curve granulometriche di progetto e il fattore di distribuzione “q”. Quest'ultimo fattore non sarà più un parametro di progetto ma un indicatore di stato, ossia permetterà di vedere come evolve la composizione granulometrica e come variano le caratteristiche volumetriche e meccaniche. Si può quindi affermare che aumentando “q” aumenta la frazione di RAP nelle miscele, conferendo maggiore struttura a ciascuno scheletro litico, incrementandone di conseguenza le performance meccaniche.

In Tabella 4.8 si riportano i valori del parametro di distribuzione “q” per le diverse miscele studiate.

Tabella 4.8 Valori di “q” per le miscele studiate

| Miscela (-) | q (-) | RAP (%) | Sludge (%) | Sabbia (%) |
|-----------------------|-----------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| Mix1-P | 0.21 | 65 | 25 | 10 |
| Mix2-P | 0.21 | 70 | 30 | - |
| Mix1-S | 0.21 | 52 | 31 | 17 |
| Mix2-S | 0.28 | 65 | 25 | 10 |
| Mix3-S | 0.32 | 70 | 21 | 9 |
| Mix4-S | 0.36 | 75 | 18 | 7 |

4.6 Definizione fase fluida ottimale con prova di spandimento

Questo tipo di prova viene solitamente impiegata nel caso dei calcestruzzi per osservare le caratteristiche di fluidità e di auto-compattazione oltre anche alla identificazione visiva della presenza di eventuali problemi di segregazione o di bleeding [11]. La prova è disciplinata dalla norma ASTM D 6103. Fissato lo scheletro solido della miscela, è stata effettuata la prova con contenuti d'acqua crescenti con l'obiettivo di determinare il contenuto d'acqua ottimale della miscela affinché questa avesse un'elevata coesione.

Il passo preliminare è quello di definire la quantità di materiale da sottoporre a prova di spandimento: si riempie il cilindro fino all'orlo con materiale secco. Si evince che la quantità di materiale che può essere posta all'interno del cilindro è di circa 900 grammi.

La prova consiste nell'utilizzo di una tavola sulla quale sono disegnate due diagonali perpendicolari tra loro e di un cilindro aperto superiormente e inferiormente (Fig. 4.9a). Il materiale di prova è inserito all'interno del cilindro che, una volta sollevato, lascerà spandere il campione verso il basso. A seconda del contenuto di acqua, il campione si distribuirà sulla tavola secondo una forma prismatica (materiale coeso) o un'impronta decisamente più estesa (elevato contenuto di acqua). La condizione ideale da raggiungere è quella in cui la miscela di acqua e aggregati tende a conservare la forma del cilindro (Fig. 4.9c). A spandimento avvenuto, si misurano le due diagonali dell'impronta (valori nulli nel caso in cui il materiale tende a tenere la propria forma).



Fig. 4.9 Prova di spandimento: tavola e cilindro (a), miscela a elevato contenuto d'acqua (b), miscela in condizione prismatica (c) e miscela assestata su se stessa (d)

Conoscendo i due diametri, si determina il valor medio in corrispondenza di ciascun valore del contenuto di acqua. I dati ottenuti sono rappresentati attraverso un grafico così costituito:

- Contenuto d'acqua (%) sulle ascisse;
- Diametro medio (cm) sulle ordinate.

I risultati di tale prova permettono di identificare il contenuto d'acqua per i quali lo spandimento è minimo (o addirittura nullo nel caso di campioni che tendono a mantenere la propria forma).

In corrispondenza di tale punto o intervallo, la miscela mostra un grado di coesione maggiore poiché la superficie di spandimento risulta minore con conseguente altezza maggiore.

Tale comportamento indica una minore richiesta di passate da parte del rullo in sito e quindi mira al soddisfacimento del requisito di "auto-compattazione".

4.7 Definizione fase fluida ottimale con tavola a scosse

La tavola a scosse (Fig. 4.10a) è un macchinario che viene impiegato per la determinazione della massa volumica degli aggregati. La norma CNR B.U. 76 definisce la massa volumica di un aggregato assestato nel modo seguente: *“la massa volumica di un aggregato assestato è la massa di un volume unitario di aggregato, comprensivo dei vuoti intergranulari e dei pori, assestato con procedimento normalizzato”*.

La macchina poggia su un basamento di calcestruzzo ed è costruita in modo tale da poter applicare, attraverso la rotazione di una manovella, una successione di cadute con una frequenza di una al secondo. Al di sopra del piano di appoggio, viene introdotta e fissata per mezzo di bulloni una fustella cilindrica le cui dimensioni sono definite dalla normativa di riferimento (C.N.R. B.U. 76). I dettagli costruttivi della tavola a scosse sono riportati in Fig. 4.10b.

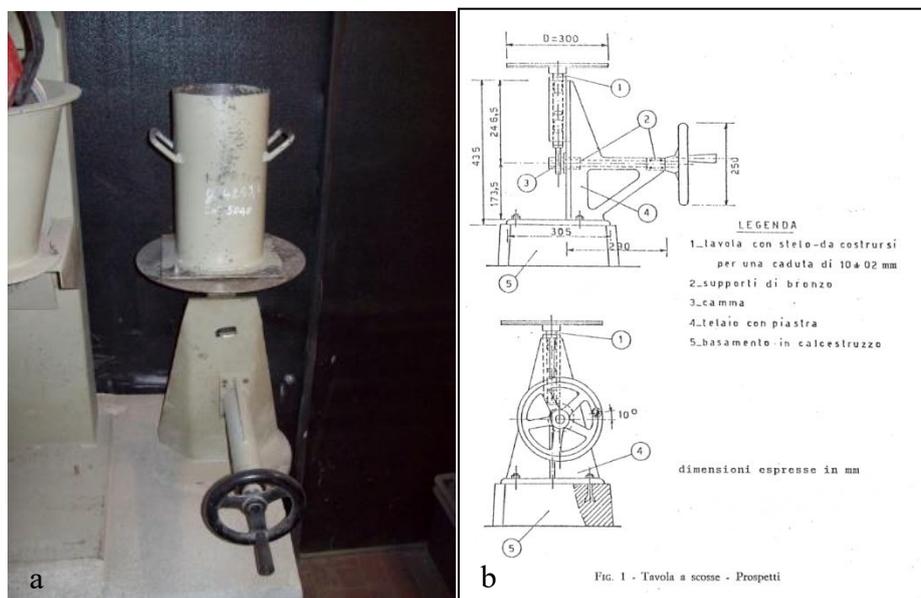


Fig. 4.10 Tavola a scosse (a) e dettagli costruttivi (b)

Il materiale da testare viene inserito all'interno di tale fustella e viene sollecitato da cadute successive applicate mediante la rotazione della manovella. La fustella deve essere sempre colma di materiale fino all'orlo. Per effetto dell'assestamento del materiale sotto l'azione impulsiva, vi sarà un abbassamento di questo all'interno della fustella ed è quindi necessario aggiungere continuamente materiale a mano.

Se dopo una successione di cadute non si registra una diminuzione di volume del materiale presente all'interno della fustella, l'assestamento può considerarsi ultimato.

Prima di pesare il materiale e quindi concludere la prova, è necessario spianare il materiale in superficie a raso orlo, colmando i vuoti eventualmente presenti sotto il bordo del cilindro. Al termine della prova, la fustella contenente il materiale addensato viene pesata. Tale procedura deve essere ripetuta tre volte e il valore finale di massa volumica è ottenuto dalla media delle tre misurazioni.

Conoscendo il peso della fustella con il materiale, il peso della fustella e il volume della fustella, è possibile calcolarne la massa volumica degli aggregati o della miscela contenuta nella fustella mediante l'equazione (4.7).

$$MV = \frac{(M_{mat+fustella} - M_{fustella})}{V_{fustella}} \quad (4.7)$$

Dove:

- $M_{mat+fustella}$ è la massa della fustella contenente il materiale al termine dell'addensamento (espressa in kg);
- $M_{fustella}$ è la massa della fustella vuota (espressa in kg);
- $V_{fustella}$ è il volume della fustella (espresso in metri cubi).

Nel seguente progetto di tesi, sia durante la pre-sperimentazione che durante la sperimentazione, sono state testate miscele costituite da RAP e sabbia.

La prova fornisce la massa volumica, e quindi i vuoti intergranulari delle miscele di RAP e sabbia. Si è valutato successivamente se il volume di vuoti intergranulari fosse tale da poter "ospitare" il volume di sludge la cui quantità in peso è determinata in fase di ottimizzazione. I risultati della prova possono anche essere utilizzati per stimare la quantità d'acqua che deve essere aggiunta per saturare completamente i vuoti.

4.8 Miscelazione e compattazione dei campioni

Le miscele studiate nel presente lavoro di tesi sono costituite da:

- RAP;
- Sludge;
- Sabbia;
- Emulsione bituminosa;
- Acqua.

Prima di compattare i campioni è necessario definire una modalità di preparazione delle miscele che può essere suddivisa nelle seguenti fasi:

- Miscelazione manuale di RAP e emulsione bituminosa insieme fino a quando il RAP non è completamente ricoperto di emulsione bituminosa;
- Aggiunta di sludge, sabbia e acqua e ulteriore miscelazione fino a ottenere una miscela omogenea;
- Attesa della rottura dell'emulsione (di durata pari circa a 30 minuti).

La macchina impiegata per compattare i campioni è la pressa a taglio giratoria (Fig. 4.11). La modalità di compattazione è disciplinata dalla norma UNI EN 12697-31.



Fig. 4.11 Pressa a taglio giratoria

L'utilizzo di tale macchina permette di raggiungere due obiettivi importanti:

- Simulazione migliore della compattazione che avviene in sito ad opera dei rulli;
- Monitoraggio del processo di compattazione.

La pressione che la macchina applica presenta delle risultanti disallineate che, insieme al movimento rotatorio della fustella, permettono di applicare delle tensioni non soltanto verticali ma anche tangenziali favorendone un migliore "mescolamento" e un migliore mutuo ingranamento, riproducendo in maniera più adeguata l'azione dei rulli.

Sistema di drenaggio

Nel presente lavoro di tesi, a differenza di quanto solitamente avviene nei conglomerati bituminosi tradizionali, le fustelle sono dotate di un sistema di drenaggio costituito da:

- Un piatto superiore, provvisto di guarnizione di tenuta;
- Un piatto inferiore forato, provvisto di guarnizione di tenuta;
- Un bicchiere di altezza pari a 11.6 cm che permette la raccolta del fluido allontanato dal campione durante la compattazione

La fustella impiegata presenta un diametro di 150 mm e, grazie al sistema precedentemente esposto, permette il drenaggio solo in direzione verticale. Con questo sistema, si riesce a simulare meglio la compattazione, e quindi il drenaggio, ed essere il più vicini possibili alle lavorazioni di cantiere. Il sistema impiegato trova riscontro nella letteratura tecnica [17], in cui appunto si sostiene come siano preferibili sistemi di compattazione che favoriscono il drenaggio in direzione verticale anziché in modalità combinata, verticale-radiale.

Operativamente, si sono confezionati tutti i campioni, sia durante la pre-sperimentazione che durante la sperimentazione, con diametro pari a 150 mm visto che l'unico bicchiere disponibile è compatibile con tale fustella.

Parametri di compattazione

I parametri di compattazione adottati in tale lavoro di tesi sono i seguenti:

- Pressione verticale pari a 600 kPa;
- Angolo di rotazione pari a 1.25° ;
- Numero di rotazioni pari a 100 e 200.

I campioni, in generale, sono stati compattati a 100 giri. In alcuni casi limitati, per osservare gli effetti dell'energia di compattazione sulla miscela, alcuni campioni, a parità di composizione, sono stati compattati a 200 giri.

Al termine del processo di compattazione, i campioni vengono posti in forno a 40°C per tre giorni in modo da allontanare completamente l'acqua presente all'interno. Dopo aver monitorato l'evoluzione del grado di umidità ad intervalli regolari giornalieri, si è ritenuto fissare in tre giorni il tempo sufficiente per essiccare completamente i campioni.

Al termine del processo di maturazione, mediante l'applicazione del metodo Corelok, è possibile definire le caratteristiche volumetriche.

4.9 Corelok e volumi reali

La definizione dei volumi dei campioni (dai quali si possono ottenere: masse volumiche, percentuale e volume di vuoti dei campioni) richiede, sostanzialmente, l'applicazione della legge di Archimede. L'applicazione della legge di Archimede richiede la realizzazione di pesate in acqua dei campioni. Data la natura del materiale, ai fini della pesata in acqua, la norma di riferimento (UNI EN 12697-8) richiede che i campioni vengano messi sottovuoto all'interno di buste di plastica utilizzando la macchina Corelok (Fig. 4.12) in modo da inibire il contatto diretto tra campione e acqua.



Fig. 4.12 Corelok

Sui campioni vengono effettuate delle pesate in aria e in acqua (campioni sottovuoto) e mediante l'applicazione dell'equazione (4.8) è possibile calcolare il volume totale (dato dalla somma del volume del campione e del volume della busta).

$$V_{totale} = \frac{(M_c - M_{ca} + M_b)}{\gamma_w} \quad (4.8)$$

Dove:

- M_c è la massa del campione asciutto dopo l'immersione sottovuoto in acqua (espressa in grammi);
- M_{ca} è la massa del campione in acqua (espressa in grammi);
- M_b è la massa della busta all'interno della quale viene inserito il campione (espressa in grammi);
- γ_w è la densità dell'acqua (espressa in grammi su centimetri cubi).

Noto il volume totale, è possibile definire il volume del campione mediante l'equazione (4.9).

$$V_c = V_{totale} - \frac{M_b}{\gamma_b} \quad (4.9)$$

Dove:

- V_{totale} , espresso in centimetri cubi, è la somma del volume del campione e del volume della busta ed è ottenuto mediante l'equazione (4.8);
- M_b è la massa della busta all'interno della quale viene inserito il campione (espressa in grammi);
- γ_b è la densità della busta all'interno della quale viene inserito il campione (espressa in grammi su centimetri cubi).

La massa volumica del campione è ottenuta mediante l'equazione (4.10).

$$MV_c = \frac{M_c}{V_c} \quad (4.10)$$

Dove:

- M_c è la massa del campione asciutto dopo l'immersione sottovuoto in acqua (espressa in grammi);
- V_c è il volume del campione (espresso in centimetri cubi).

La percentuale dei vuoti si ottiene applicando l'equazione (4.11).

$$v_c = 100 \cdot \left(1 - \frac{MV_c}{MVA}\right) \quad (4.11)$$

Dove:

- MV_c è la massa volumica del campione (espressa in grammi su centimetri cubi);
- MVA , espressa in grammi su centimetri cubi, è la massima massa volumica apparente della miscela definita con la procedura descritta al paragrafo 4.1.2.

4.10 Rette di lavorabilità

La compattazione alla pressa a taglio giratoria permette di ottenere campioni che possono essere sottoposti alla valutazione delle caratteristiche volumetriche e meccaniche.

Lo studio delle caratteristiche volumetriche, mediante Corelok, consente di definire il volume del campione reale e i relativi vuoti al termine della compattazione. Le altezze geometriche fornite dalla pressa a taglio giratoria devono essere corrette. Esse, includono anche l'altezza del bicchiere che deve essere quindi sottratta per definire l'altezza geometrica del campione. Noti il diametro del campione (150 mm) e l'altezza geometrica ad ogni rotazione è possibile definirne il volume geometrico da cui, in seguito all'elaborazione dei dati, si ottiene la percentuale di compattazione geometrica.

Bisogna tenere conto che il volume geometrico è differente rispetto a quello reale e per tale ragione è necessario applicare una correzione alla percentuale di compattazione ad ogni rotazione.

La correzione da applicare ad ogni giro è definita dall'equazione (4.12).

$$C = \frac{MV_c}{MV_{geometrica}} \quad (4.12)$$

Dove:

- MV_c è la massa volumica del campione al termine della compattazione in funzione del volume reale (espressa in grammi su centimetri cubi);
- $MV_{geometrica}$ è la massa volumica del campione al termine della compattazione in funzione del volume geometrico (espressa in grammi su centimetri cubi).

L'evoluzione della compattazione reale al variare del numero di rotazioni viene riportato in un grafico così costituito:

- Percentuale di compattazione (%) in ordinate;
- Numero di rotazioni in scala logaritmica sulle ascisse.

Si ottengono così le curve di compattazione o rette di lavorabilità, interpolate attraverso una retta di regressione (4.13).

$$C = C_{20} + k_{20} \cdot \log x \quad (4.13)$$

Dove:

- C_{20} , è l'auto-compattazione dalla ventesima rotazione in poi;
- k_{20} è la lavorabilità della miscela dalla ventesima rotazione in poi;
- x è il numero della rotazione.

Per asserire le caratteristiche di addensamento delle miscele, si fa riferimento all'auto-compattazione dopo la prima rotazione mentre la lavorabilità è definita a partire dalla ventesima rotazione in poi. Infatti, come verrà mostrato nel capitolo 5, i punti sperimentali acquisiti durante la compattazione si dispongono nel piano di riferimento seguendo un trend bi-lineare. Per le varie miscele si denota un cambio di pendenza in corrispondenza della ventesima rotazione. Fino a tale punto, l'energia di compattazione è spesa principalmente per il drenaggio della fase fluida e dalla ventesima rotazione in poi si sviluppa la compattazione vera e propria. Infatti, attraverso uno studio condotto ad hoc,

si vede che durante le prime venti rotazioni è drenato circa il 50 % della fase fluida: le risultanze dello studio in questione sono riportate in Tabella 4.9.

Tabella 4.9 Analisi del drenaggio della fase fluida

| Rotazioni (-) | Altezza iniziale (mm) | Altezza finale (mm) | Peso campione (g) | Acqua drenata cumulativa (g) |
|---------------|-----------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
| 0 | - | 57.0 | 2237 | 111.4 |
| 1 | 57.0 | 54.0 | 2190.8 | 157.6 |
| 1-10 | 54.0 | 52.7 | 2170 | 178.4 |
| 11-20 | 52.7 | 51.9 | 2155.7 | 192.7 |
| 21-30 | 52.0 | 51.3 | 2145.4 | 203 |
| 31-40 | 51.5 | 50.9 | 2136 | 212.4 |
| 41-50 | 51.1 | 50.5 | 2131 | 217.4 |

Lo studio in questione fa riferimento al Mix2-S con fase fluida del 20% (ripartita con il 4 % di emulsione bituminosa e il 16 % di acqua). Le modalità di miscelazione e compattazione seguono l'approccio precedentemente illustrato. In Tabella 4.9 sono riportati in corrispondenza delle rotazioni applicate l'altezza iniziale e finale, il peso wet (frazione solida più fase fluida) del campione e la fase fluida drenata. Si nota come fino alla ventesima rotazione l'acqua drenata è 192.7 grammi, che corrispondono all'incirca al 50 % della fase fluida totale utilizzata (peso della frazione solida utilizzata pari a 2000 grammi). Dalla ventesima rotazione in poi l'acqua drenata è pari a 24.7 grammi che corrisponde a circa il 6 % della fase fluida utilizzata. A questo punto, si può concludere che durante le prime venti rotazioni l'energia di compattazione è maggiormente spesa per drenare l'acqua e da quel punto in poi, visto il bassissimo drenaggio, avviene l'ingranamento dello scheletro litico, favorito dalla rimanente fase fluida.

Affinché l'obiettivo di definire miscele altamente lavorabili possa essere perseguito, è necessario studiare rispettivamente i parametri k_{20} (affine alla fluidità) e C_1 (affine all'auto-compattazione) in modo che questi vengano massimizzati. È bene ricordare che queste caratteristiche devono comunque assicurare il soddisfacimento del requisito tecnico e quindi garantire la funzione strutturale della pavimentazione. È quindi necessario definire il corretto bilanciamento tra lavorabilità e performance meccaniche.

4.11 NAT e modulo di rigidità

Il Nottingham Asphalt Tester (NAT) è una macchina (Fig. 4.13a) in grado di stimare il modulo di rigidità dei provini attraverso prove di trazione indiretta a carico impulsivo ripetuto.

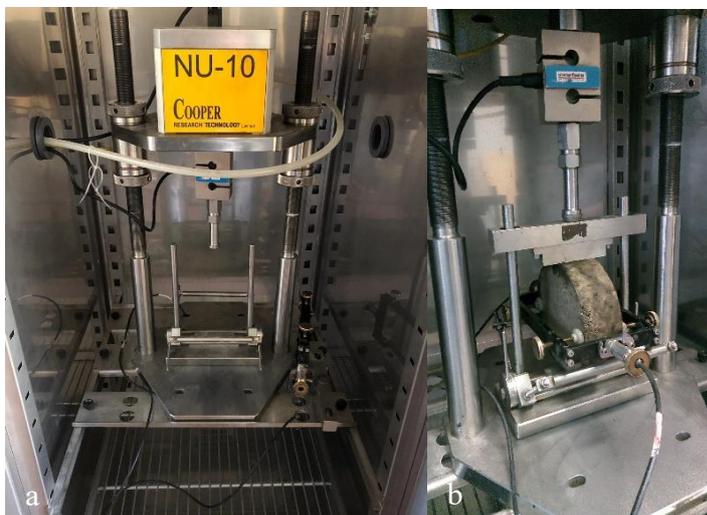


Fig. 4.13 Nottingham Asphalt Tester (NAT) (a) e configurazione di prova (b)

La struttura di carico della macchina si compone di due montanti verticali fissati ad una piastra di base su cui alloggia il castelletto di prova. L'unità di controllo riceve i dati di forza registrati da parte della cella di carico che è collegata all'attuatore di carico. L'attuatore di carico applica la sollecitazione ai campioni ed è azionato attraverso un sistema pneumatico collegato ad un compressore esterno. La presenza di una cella climatica permette di monitorare la temperatura durante lo svolgimento della prova.

Dopo aver preparato la macchina, si inserisce un campione all'interno del castelletto di prova. Successivamente, viene posizionato un travetto d'acciaio passante per le guide verticali. Allo scopo di ripartire il carico in maniera uniforme, tra il travetto e il pistone di carico, viene inserita una sfera di acciaio. Oltre al fissaggio del campione, il castelletto di prova permette il posizionamento dei trasduttori in direzione diametrale in modo tale da ottenere i valori di deformazione richiesti (Fig. 4.13b).

I risultati della prova vengono trasferiti al sistema di acquisizione e controllo dei dati.

Tale prova è di tipo non distruttivo ed è disciplinata dalla norma UNI EN 12697-26.

All'interno del presente lavoro di tesi, il NAT è impiegato per determinare il modulo di rigidità dei campioni in configurazione di trazione indiretta. Il modulo di rigidità è un parametro meccanico che può essere utilizzato come parametro di confronto tra diverse miscele ma soprattutto come parametro strutturale per il dimensionamento della pavimentazione.

La prova consiste nell'applicare una compressione verticale impulsiva $P(t)$ in direzione diametrale seguita da un determinato periodo di riposo. L'azione di compressione verticale applicata dalla macchina produce un allungamento (Δ) nella direzione perpendicolare generando tensioni di trazione (ϵ) agenti sul piano verticale.

Il disallineamento temporale (r_t) tra la tensione applicata e la deformazione prodotta è in funzione della natura visco-elastica del materiale (Fig. 4.14).

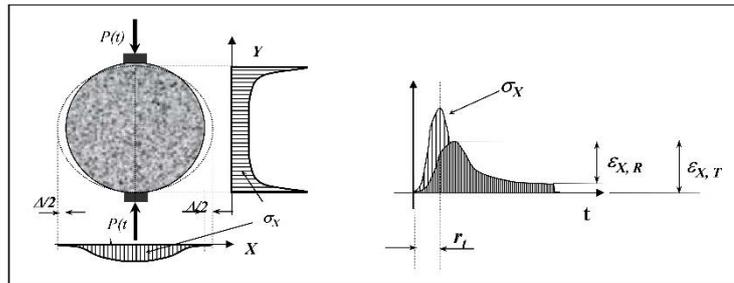


Fig. 4.14 Caratteristiche tenso-deformative di un campione sottoposto alla prova di modulo di rigidezza

La prova di modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (dall'inglese "ITSM", Indirect Tensile Stiffness Modulus), eseguita in controllo di deformazione, segue i settaggi di seguito riportati:

- Diametro del campione (15 cm);
- Coefficiente di Poisson ν (assunto pari a 0.35);
- Temperatura di prova (20°C);
- Tempo di picco (124 ms);
- Durata complessiva impulso (3 sec);
- Deformazione orizzontale (7 μm);
- Altezza del campione (mm);
- Numero di colpi di condizionamento (10).

La fase di condizionamento, che precede la fase di stima del modulo di rigidezza, è quello step in cui la macchina applica una serie di impulsi (10) con un periodo di ripetizione prefissato (3 sec) e intensità variabile. Al termine del 10° impulso, è nota l'intensità del carico (kN) che genera una deformazione orizzontale di ampiezza imposta (7 μm). Di conseguenza, la sollecitazione così determinata è applicata verticalmente in modo impulsivo per 5 volte: il rise time e la durata totale dell'impulso sono uguali alla fase di condizionamento. Il modulo di rigidezza E è stimato al termine di ciascun impulso di carico.

Tale procedimento va ripetuto anche nella direzione perpendicolare.

Da un punto di vista teorico, la determinazione del modulo di rigidezza si basa sulla teoria dell'elasticità derivata da Frocht, le cui ipotesi di base riguardano l'applicazione di uno stato piano di tensione, il materiale è omogeneo, lineare elastico ed isotropo ed il carico è applicato attraverso una linea di carico ben definita. Quando queste ipotesi sono rispettate, lo stato tensionale all'interno del campione può essere ricavato in forma chiusa e di conseguenza il modulo di rigidezza, espresso tramite l'Eq (4.14):

$$E = \frac{F}{z \cdot h} (0.273 + \nu) \quad (4.14)$$

Dove:

- F è il carico applicato (espresso in kN);
- z è la deformazione misurata dai trasduttori lungo l'asse orizzontale (μm);
- h è lo spessore del campione (mm);
- ν è il coefficiente di Poisson (assunto pari a 0.35).

In virtù di tale assunzione, è necessario effettuare le prove lungo due diametri perpendicolari per controllare che i valori di modulo ottenuti in una direzione non si discostino eccessivamente nell'altra. I valori dei moduli di rigidezza ottenuti nelle due

direzioni perpendicolari devono essere mediati qualora questi non differiscano del +10% o -20%.

Sebbene la corrente versione della norma non preveda la necessità di alcuna correzione, in questa sperimentazione si è ritenuto opportuno correggere il modulo di rigidezza stimato con l'Eq. 1.9 attraverso la formula definita nella precedente versione della EN 12697-26. Infatti, è necessario tenere in conto che non sempre il rapporto tra l'area sottesa all'impulso tra 0 e 124 ms e l'area del rettangolo che inscrive detta area è pari a 0.6: di conseguenza, il modulo di rigidezza è corretto tramite un fattore "k", stimato dal NAT durante la prova. In definitiva, il modulo di rigidezza è calcolato tramite l'equazione (4.15).

$$E' = E(1 - 0.322 \cdot (\log E - 1.82) \cdot (0.6 - k)) \quad (4.15)$$

Dove:

- E' è il modulo di rigidezza corretto (espresso in MPa);
- E, espresso in MPa, è il modulo di rigidezza calcolato mediante l'equazione (4.14);
- k è il fattore di carico misurato (adimensionale).

4.12 Pressa statica e prova di trazione indiretta

La prova di resistenza a trazione indiretta permette di determinare per l'appunto la resistenza a trazione indiretta (RTI) delle miscele impiegate. È una prova eseguita imponendo una velocità di spostamento pari a 50.8 mm/s. La prova di resistenza a trazione indiretta è storicamente presente all'interno dei capitolati e permette di identificare un parametro meccanico universalmente riconosciuto, utile sia per il mix design che per il controllo di qualità delle miscele bituminose.

Nella presente sperimentazione, la macchina utilizzata per condurre la prova di resistenza a trazione indiretta è la pressa statica, rappresentata in Fig. 4.15a. Più in generale, la pressa statica permette di eseguire anche la prova Marshall (definizione di stabilità e scorrimento) e una serie di prove in controllo di velocità di spostamento.



Fig. 4.15 Pressa statica (a) e configurazione di prova (b)

La pressa statica è formata da due traverse, una superiore fissa, che fa da contrasto, e una inferiore mobile, che avanza verticalmente secondo la velocità imposta (50.8 mm/s). Tra le due traverse viene inserito un castelletto di carico, dotato di due strips che permettono di ammorsare superiormente e inferiormente il campione e distribuire uniformemente il carico. Il movimento della traversa inferiore permette di applicare una sollecitazione dal basso verso l'alto che sarà registrata dalla cella di carico posta nella parte superiore della pressa. La deformazione del campione è misurata attraverso un trasduttore di spostamento, orientato dall'alto verso il basso, che punta su un sistema di appoggio solidale con la base inferiore del castelletto.

Il diametro dei campioni confezionati sia durante la fase di pre-sperimentazione sia durante la sperimentazione è pari a 150 mm mentre le altezze risultano essere variabili e rientrano nei limiti imposti dalla norma UNI EN 12697-23.

Il provino viene sollecitato da forze verticali che lo deformano, rispetto alla linea di carico, sia in direzione perpendicolare, dando luogo a tensioni di trazione, sia in direzione verticale, generando tensioni di compressione. Tale prova è di tipo distruttivo poiché le tensioni di trazione che si generano per effetto dell'applicazione del carico portano a rottura il campione.

La macchina è collegata ad un computer che permette la registrazione di ogni step di carico in funzione della deformazione verticale. Da queste coppie di punti è possibile definire le curve di resistenza a trazione indiretta all'interno del piano così costituito:

- Forza verticale applicata (ordinate);
- Spostamento verticale registrato (ascisse).

Tale prova è disciplinata dalla norma UNI EN 12697-23 e prevede che il valore di resistenza a trazione indiretta di ogni campione venga determinato mediante l'equazione (4.16).

$$RTI = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (4.16)$$

Dove:

- RTI è la resistenza a trazione indiretta (espressa in MPa);
- P è il carico verticale di picco (espresso in kN);
- D è il diametro del campione (espresso in mm);
- H è l'altezza del campione (espressa in mm).

4.13 Compattatore a lastre

La realizzazione di lastre permette di avere informazioni su scala maggiore rispetto a quanto osservato con la pressa a taglio giratoria. Le lastre, prima di essere sottoposte a prove meccaniche, devono essere compattate mediante il compattatore BBPAC.

Il compattatore BBPAC si compone principalmente di due parti: modulo di comando e macchina compattatrice. Il modulo di comando è utilizzato per inviare l'input al compattatore e controllare le impostazioni durante la prova. La macchina compattatrice è costituita da tre parti:

- Pneumatico in gomma, in funzione della configurazione di compattazione adottata, esso può muoversi in direzione longitudinale e trasversale in modo da realizzare la compattazione;
- Piano d'acciaio, è il piano d'appoggio del cassero nel quale vi è il materiale da compattare;
- Vano di alloggiamento, contiene pompe elettriche, pneumatiche e sistemi elettrici vari.

Il piano d'appoggio del cassero è mobile in modo da garantire il contatto tra il materiale e lo pneumatico durante la compattazione. È stato inserito un supporto drenante denominato DropBox. Il DropBox è un accessorio che è necessario introdurre per raccogliere la fase fluida drenata durante la compattazione. In generale, la normativa di riferimento per le miscele bituminose calde è la UNI EN 12697-33, che fornisce tutte le indicazioni per realizzare lastre di diverse dimensioni. Vista la specificità del materiale (in particolare, l'eccesso di fase fluida), si è ritenuto opportuno non seguire la normativa in questione e di realizzare un protocollo di compattazione ad hoc per le miscele afferenti alla sperimentazione. Vista la complessità dell'intera procedura di compattazione, si è pensato di restringere il confezionamento delle lastre soltanto alle miscele che hanno fornito i valori peggiori (Mix2-S-16) e migliori (Mix4-S-13.5) di resistenze meccaniche (prova RTI e ITSM). Prima di realizzare la compattazione, si definiscono le quantità in peso di ciascuna frazione granulometrica (RAP, sludge e sabbia), acqua ed emulsione bituminosa, cercando di riprodurre le condizioni volumetriche osservate nei campioni confezionati con la pressa a taglio giratoria. Le lastre impiegate per la compattazione presentano dimensioni pari 500x180x150 mm. A partire dai dati di massa volumica apparente e massa volumica geometrica (definita in funzione delle caratteristiche volumetriche dei campioni cilindrici), è possibile definire il quantitativo di materiale da inserire per ciascuna lastra. Si calcolano dapprima i vuoti geometrici mediante l'equazione (4.17).

$$v_{geom} = 100 \cdot \left(1 - \frac{MV_{geom}}{MVA} \right) \quad (4.17)$$

Dove:

- v_{geom} sono i vuoti geometrici (espressi in percentuale);
- MV_{geom} è la massa volumica geometrica della miscela (espressa in grammi su centimetri cubi);
- MVA è la massa volumica apparente della miscela definita tramite procedura descritta al paragrafo 4.1.2 (espressa in grammi su centimetri cubi).

La massa di materiale da inserire nella lastra è definita attraverso l'equazione (4.18):

$$M = MVA \cdot V_{geom-lastra} \cdot \left(1 - \frac{v_{geom}}{100}\right) \quad (4.18)$$

Dove:

- M è la massa del materiale da inserire nella lastra (espressa in kilogrammi);
- $V_{geom-lastra}$ è il volume geometrico della lastra (espresso in metri cubi).

La massa della lastra così definita fa riferimento a condizioni asciutte (0 % acqua all'interno dei vuoti) e compattate (dimensioni e tenore di vuoti geometrico noto). Risulta quindi agevole riproporzionare il peso totale al singolo contributo di ogni componente solido (RAP, sludge, sabbia e bitume dall'emulsione bituminosa) e definire la quantità di acqua complessiva (contenuta nell'emulsione bituminosa e di aggiunta).

In definitiva, conoscendo ogni componente (solido e liquido), si è passati alla fase di miscelazione, lavorando manualmente un terzo della miscela per volta, secondo la procedura già definita al paragrafo 4.8. Infine, si uniscono i tre impasti, miscelandoli per circa 2 minuti. La divisione appena illustrata risiede nella necessità di alleggerire le operazioni manuali, viste le elevate quantità in gioco.

La composizione delle lastre compattate è riportata in Tabella 4.10.

Tabella 4.10 Miscele compattate al compattatore BBPAC

| ID | RAP | Sludge | Sabbia | A | B |
|-------------|-----|--------|--------|---|------|
| Mix2-S-16 | 65 | 25 | 10 | S | 16 |
| Mix4-S-13.5 | 75 | 18 | 7 | S | 13.5 |

Dopo aver atteso 30 minuti, le lastre sono compattate utilizzando una modalità definita ad hoc per il caso di studio. La compattazione avviene lungo tre direttrici (una centrale e due laterali), con ruota libera e applicando una pressione di compattazione pari a 0.1 kPa. Si è evitata una pressione di compattazione superiore per ridurre la fuoriuscita del materiale lungo le sponde laterali del cassero. Lungo ciascuna direttrice si è applicato un ciclo di compattazione per volta. Si è ritenuto, inoltre, opportuno introdurre una piastra tra la superficie di compattazione e la ruota: si è cercato di evitare che la ruota spingesse il materiale soltanto verso il senso opposto al punto di partenza, incrementando così l'efficacia di compattazione anche in senso verticale.

Al termine del processo di compattazione, al fine di permettere l'evaporazione completa dell'acqua, è necessario porre le lastre in stufa a 40 °C per circa tre giorni.

4.14 Resistenza all'ormaiamento

Le due lastre realizzate, al termine del processo di maturazione, vengono poste all'interno della macchina ormaiatrice. La prova permette di valutare la resistenza del materiale all'azione combinata del traffico e delle alte temperature. La pressione applicata dalla ruota è pari a 600 kPa in accordo con la norma di riferimento UNI EN 12697-22. La suddetta norma richiede la misurazione dell'ormaiatura in 15 punti seguendo lo schema riportato in Fig. 4.16.

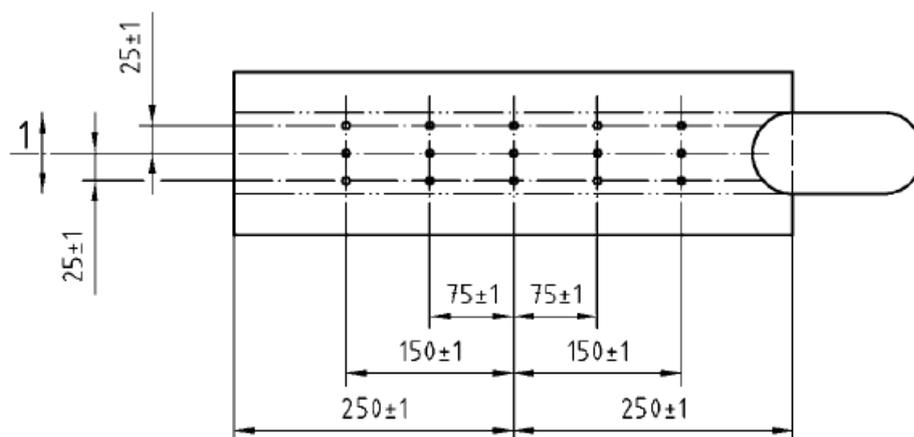


Fig. 4.16 Punti di misura

Affinché si possa avere un'affidabilità e una ridondanza maggiore delle osservazioni, i punti di misura nel presente lavoro di tesi sono stati incrementati a 27. La misurazione della profondità dell'ormaiatura è avvenuta mediante l'utilizzo di tre trasduttori.

Nel presente lavoro di tesi, non avendo bene presente il quadro del comportamento meccanico dei materiali quando testati in scala maggiore, si è deciso dapprima di eseguire la prova di ormaiamento con le seguenti modalità:

- 1000 cicli di condizionamento a temperatura ambiente;
- 1000 cicli di prova a temperatura ambiente;
- 3000 cicli di prova a temperatura ambiente;
- 10000 cicli di prova a temperatura ambiente.

Al termine di ogni ciclo sono state effettuate le letture della profondità dell'ormaiatura. Dopo aver visto la buona risposta meccanica delle lastre dopo i 10000 cicli di prova a temperatura ambiente, si è deciso di sottoporre le stesse a un nuovo ciclo di ormaiamento ad una temperatura pari a 60 °C. In questo modo, si può valutare anche l'influenza della temperatura sulla resistenza all'accumulo delle deformazioni permanenti. Le modalità di prova sono le seguenti:

- 1000 cicli a 60 °C;
- 3000 cicli a 60 °C;
- 10000 cicli a 60° C;
- 30000 cicli a 60° C.

Al termine di ogni ciclo sono state effettuate le letture della profondità dell'ormaiatura.

Noti gli abbassamenti ad ogni ciclo e per ogni temperatura, è possibile calcolare P_i (%) mediante l'equazione (4.19) che rappresenta l'incremento percentuale della profondità dell'ormaia rispetto ai 1000 cicli di condizionamento.

$$P_i = 100 \cdot \sum_{j=1}^{27} \frac{(m_{ij} - m_{0j})}{(27 \cdot h)} \quad (4.19)$$

Dove:

- m_{ij} è la deformazione locale al ciclo i -esimo nel punto j -esimo (mm);
- m_{0j} è la deformazione locale iniziale nel punto j -esimo (mm);
- h è l'altezza media del materiale nella lastra (mm).

I risultati vengono riportati in un grafico così costituito:

- P_i sulle ordinate;
- N_i sulle ascisse (in scala logaritmica).

5 Analisi dati

Lo scopo di questo capitolo è quello di riassumere i risultati ottenuti seguendo il programma sperimentale precedentemente descritto.

La prima parte di indagine sperimentale (pre-sperimentazione) ha avuto l'obiettivo di definire i protocolli e le tecniche da attuare per raggiungere gli obiettivi prefissati (sperimentazione): basso costo di produzione, sostenibilità ambientale, elevata lavorabilità e buone performance meccaniche. Essendo nella fase di pre-sperimentazione, ossia il luogo in cui si definiscono gli strumenti e si mettono a punto tutti i protocolli di analisi da adottare nella sperimentazione, e data la limitata disponibilità dei materiali, si è proceduto alla progettazione di due set di miscele (con e senza sabbia) fissando un solo valore del parametro di distribuzione "q" (nella fattispecie $q=0.21$).

La seconda parte di indagine sperimentale (sperimentazione) è effettuata con l'intento di realizzare, sulla base di quanto fatto nella pre-sperimentazione, un'analisi più accurata e precisa per definire il set di miscele in grado di raggiungere gli obiettivi prefissati. Partendo dallo stesso valore di "q" adottato durante la pre-sperimentazione non si ottiene una miscela in grado di raggiungere gli obiettivi prefissati. Al fine di raggiungere gli obiettivi finali nuove miscele sono progettate, incrementando il dosaggio di RAP e imponendo un limite al rapporto tra la quantità in peso della sludge e quella della sabbia. Il fattore di distribuzione "q" è retro-calcolato ed assunto come indicatore di stato.

5.1 Pre-sperimentazione

L'obiettivo della fase di pre-sperimentazione è quello di definire gli strumenti e le modalità di prova da attuare per raggiungere gli scopi prefissati. Lo scheletro litico segue il modello di Funk e Dinger ($q = 0.21$). La fase fluida, definita come somma del contenuto di acqua e di emulsione bituminosa, è definita mediante prova alla tavola a scosse e prova di spandimento. I provini vengono successivamente compattati e sottoposti a prove volumetriche e meccaniche (nella fattispecie modulo di rigidezza e resistenza a trazione indiretta).

5.1.1 Definizione scheletro litico

Nel presente lavoro di tesi l'ottimizzazione dello scheletro solido è avvenuta rispetto alla curva granulometrica di progetto definita con il modello di Funk e Dinger ($q = 0.21$). In accordo a quanto realizzato da Choorackal et al. [12], l'ottimizzazione è stata realizzata trascurando la presenza del legante. L'assunzione di trascurare la presenza del legante può ritenersi corretta per via della bassa presenza di emulsione bituminosa (4%). Le curve granulometriche dei materiali base (RAP, sludge e sabbia) sono riportate in Fig. 5.1 mentre le masse volumiche apparenti (MVA) sono riportate in Tabella 5.1.

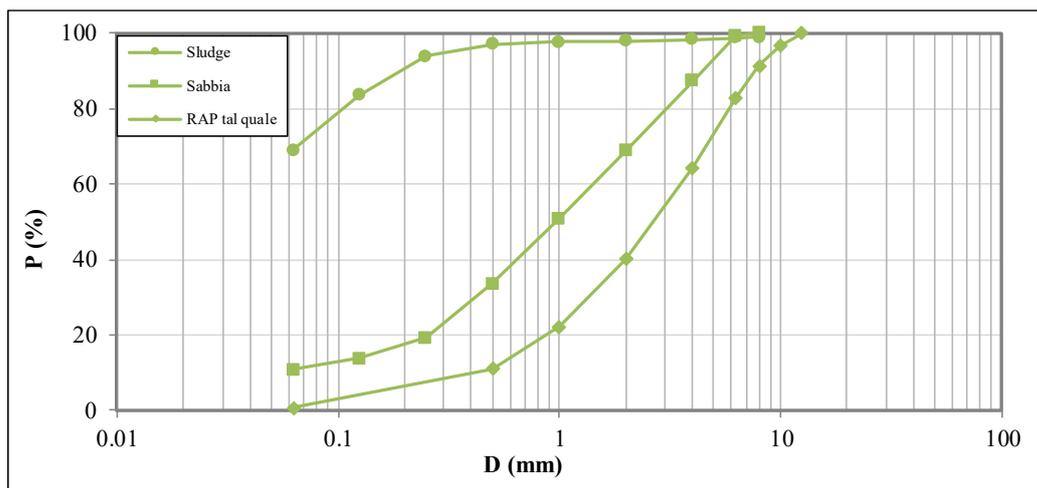


Fig. 5.1 Curve granulometriche materiali – pre-sperimentazione

Tabella 5.1 MVA materiali – pre-sperimentazione

| | RAP (kg/m ³) | Sludge (kg/m ³) | Sabbia (kg/m ³) |
|-----|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| MVA | 2468 | 2810 | 2746 |

Come già discusso precedentemente, durante la fase di pre-sperimentazione si definiscono due set di miscele (con e senza sabbia), indicate con Mix1-P e Mix2-P. Il parametro di distribuzione “q” adottato per il modello di Funk e Dinger è pari a 0.21. La composizione delle miscele è riportata in Tabella 5.2.

Tabella 5.2 Composizione in peso delle miscele della pre-sperimentazione

| Miscela | q | RAP | Sludge | Sabbia |
|---------|------|-----|--------|--------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (%) |
| Mix1-P | 0.21 | 65 | 25 | 10 |
| Mix2-P | 0.21 | 70 | 30 | - |

Le curve granulometriche delle miscele Mix1-P e Mix2-P sono praticamente sovrapposte e riportate in Fig. 5.2. La sovrapposizione di queste due curve è legata allo stesso parametro di distribuzione “q” adottato per la curva di progetto (modello di Funk e Dinger).

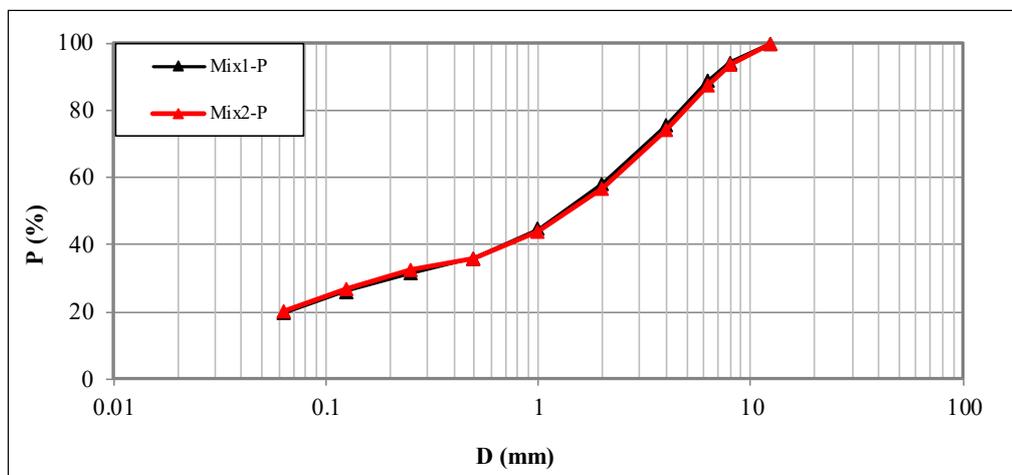


Fig. 5.2 Granulometrie miscele – pre-sperimentazione

5.1.2 Prova di spandimento

Lo scheletro solido delle miscele è ottenuto combinando le tre classi granulometriche (RAP, sludge e sabbia) secondo la curva di progetto definita col modello di Funk e Dinger, per $q = 0.21$. Lo step successivo è quello di definire la fase fluida ottimale di ciascuna miscela.

La fase fluida ottimale è data dalla somma di emulsione bituminosa e acqua di aggiunta, dosata in percentuale sul 100 % rispetto al peso degli aggregati secchi. Il compito dell'acqua di aggiunta è quello di conferire lavorabilità alla miscela favorendone la compattazione. L'emulsione bituminosa è una sospensione di bitume in acqua ed in seguito al completamento del processo di rottura, l'acqua evapora e il bitume residuo svolge la funzione di legante.

Gli approcci più comuni per la definizione del contenuto d'acqua delle miscele bituminose sono solitamente relativi allo studio Proctor come effettuato da Saride et al. [15] e alla massimizzazione delle caratteristiche meccaniche come sostenuto da Gómez-Mejide et al. [14].

L'intenzione di realizzare miscele altamente lavorabili che presentano caratteristiche di fluidità e di auto-compattazione ha richiesto, per la definizione della fase fluida, un approccio diverso da quelli solitamente utilizzati per le miscele bituminose. Nel presente lavoro di tesi, la fase fluida ottimale è definita mediante prova di spandimento seguendo l'approccio adottato da Choorackal et al. [12] per le miscele cementizie ad elevata lavorabilità. È bene precisare che le prove di spandimento sono realizzate impiegando acqua mentre la fase fluida della miscela è costituita sia da acqua che da emulsione bituminosa. L'emulsione bituminosa, prima di rompere, si comporta da fluido come osservato da Grilli et al. [17]. È quindi possibile ritenere che l'effetto del fluido (acqua ed emulsione bituminosa) sullo spandimento sia analogo a quello dell'acqua. In virtù di tale osservazione è possibile condurre le prove di spandimento senza impiegare emulsione bituminosa ed estendere i risultati anche al caso con emulsione bituminosa.

I risultati della prova di spandimento vengono riportati in Fig. 5.3.

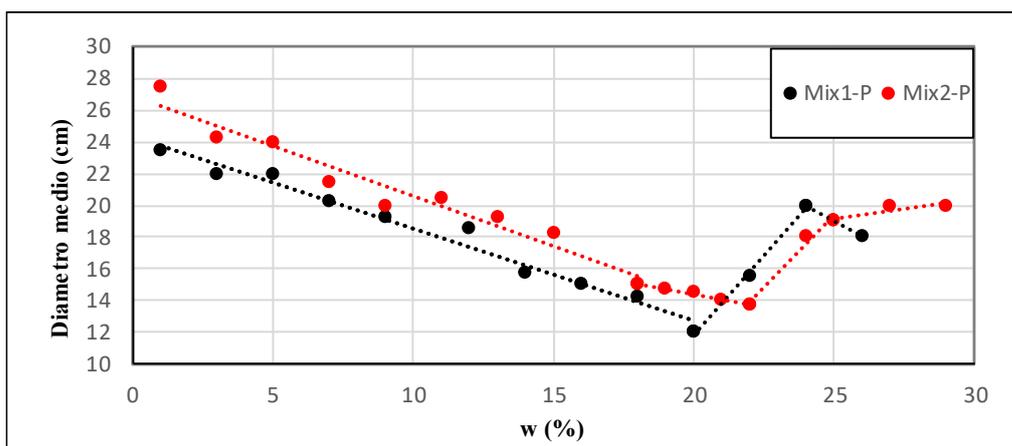


Fig. 5.3 Prova di spandimento – pre-sperimentazione

Le miscele Mix1-P e Mix2-P presentano un trend bi-lineare:

- Ramo discendente (per contenuti d'acqua da 1% a 20%): lo spandimento diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua poiché le frazioni granulari, imbibendosi di acqua, sviluppano un'azione coesiva a cui consegue una riduzione dello spandimento. Probabilmente, l'azione coesiva è conferita maggiormente dalla sludge;
- Ramo ascendente (per contenuti d'acqua maggiori del 20%): raggiunto il minimo, lo spandimento aumenta all'aumentare del contenuto d'acqua. Sembra presente un'azione di trascinamento ad opera dell'acqua con conseguente incremento dell'impronta di spandimento.

Confrontando lo spandimento tra le due miscele si osserva come il trend si sposti verso destra all'aumentare del contenuto di sludge. Infatti, la sludge umida conferisce coesione all'intera miscela. Di conseguenza, per sviluppare la stessa coesione e quindi ottenere la stessa impronta di spandimento, all'aumentare del contenuto di sludge è richiesta più acqua.

Il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale lo spandimento risulta minimo (Tabella 5.3) è identificato come fase fluida ottimale. Di conseguenza, la fase fluida ottimale di sola acqua è riproporzionata considerando anche il 4 % di emulsione bituminosa (Tabella 5.3) Da notare che per la miscela Mix2-P il punto di minimo non è ben marcato come per la miscela Mix1-P: tra il 18 % e il 22 % di fase fluida c'è una minima variazione dello spandimento che può essere approssimato con un tratto orizzontale. Di conseguenza, per la miscela Mix2-P, la fase fluida ottimale è presa in corrispondenza del primo valore minimo, ossia il 18 %.

Tabella 5.3 Contenuto d'acqua e fase fluida ottimale

| Miscela | w | FF |
|---------|------|--------|
| (-) | (%) | (%) |
| Mix1-P | 20.0 | 16A+4E |
| Mix2-P | 18.0 | 14A+4E |



Fig. 5.4 Spandimento Mix1-P-20 (a) e Mix2-P-25 (b)

In Fig. 5.4a è riportato lo spandimento minimo della miscela Mix1-P. E' possibile osservare un maggiore grado di coesione della miscela. In Fig. 5.4b si può notare, invece, un'azione di trascinamento dell'acqua sulla miscela Mix2-P.

5.1.3 Tavola a scosse

Durante la pre-sperimentazione, oltre alla prova di spandimento, per la definizione del contenuto d'acqua si è realizzata una prova alla tavola a scosse. La fase fluida ottimale è determinata analiticamente ed è quella quantità di acqua che satura completamente i vuoti intergranulari. La prova alla tavola a scosse è eseguita su miscele costituite da RAP e sabbia. Attraverso semplici procedimenti matematici è possibile definire, per ogni miscela, la massa volumica (MV) (Fig. 5.5) e successivamente il contenuto di vuoti (Fig. 5.6).

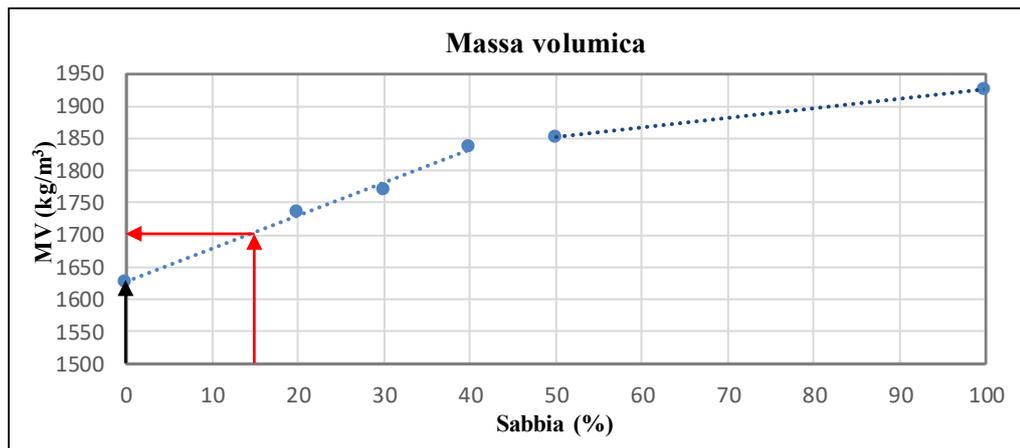


Fig. 5.5 Massa volumica – pre-sperimentazione

La massa volumica aumenta all'aumentare del contenuto di sabbia e può essere imputato al fatto che la sabbia, avendo una granulometria più fine, può riempire i vuoti intergranulari e quindi contribuire ad incrementare il peso della miscela a parità di volume.

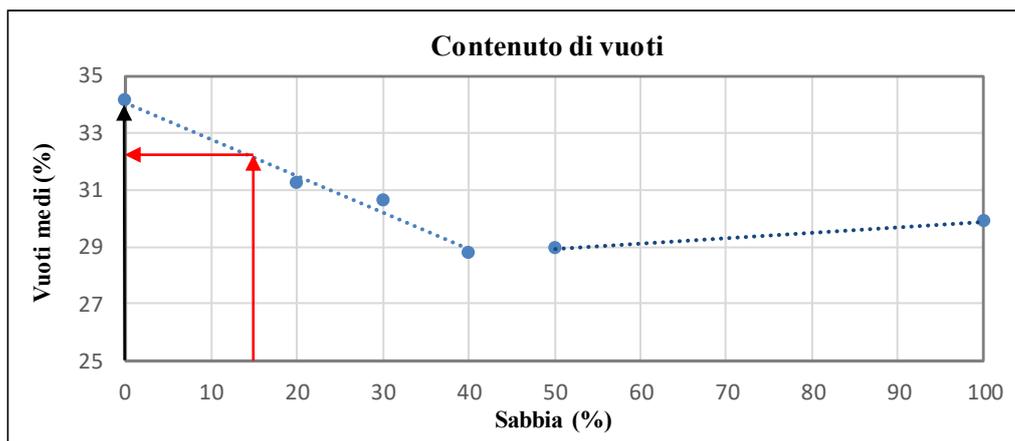


Fig. 5.6 Contenuto di vuoti – pre-sperimentazione

Il contenuto di vuoti non segue l'andamento della massima volumica poiché ogni miscela è caratterizzata da una massa volumica apparente differente. La massa volumica apparente di ogni miscela è definita pesando le masse volumiche apparenti di RAP e sabbia con le loro quantità all'interno della miscela.

In Tabella 5.4 sono riportate la composizione della miscela, la massa volumica, la massa volumica apparente e il contenuto di vuoti per le miscele assestate con tavola a scosse.

Tabella 5.4 Caratteristiche miscele RAP-Sabbia

| ID (-) | RAP (%) | Sabbia (%) | MV (kg/m ³) | MVA (kg/m ³) | Vuoti (%) |
|-----------|------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|--------------|
| 1 | 100 | 0 | 1627 | 2468 | 34.1 |
| 2 | 50 | 50 | 1852 | 2607 | 28.9 |
| 3 | 60 | 40 | 1837 | 2579 | 28.8 |
| 4 | 70 | 30 | 1771 | 2551 | 30.6 |
| 5 | 80 | 20 | 1736 | 2523 | 31.2 |
| 6 | 0 | 100 | 1925 | 2746 | 29.9 |

La composizione della miscela Mix1-P è ottenuta attraverso il modello di Funk e Dinger e, come già detto, è formata da RAP, sludge e sabbia. Per ottenere indicazioni utili sulla percentuale di vuoti per questa miscela è necessario effettuare un collegamento con i dati ottenuti dalla tavola a scosse (RAP-sabbia). La miscela in questione, ai fini della determinazione della percentuale dei vuoti intergranulari ottenuta con la tavola a scosse, equivale a una miscela costituita dall'86% di RAP e dal 14% di sabbia. A questa miscela corrisponde un contenuto di vuoti pari a 32%. I vuoti intergranulari devono essere riempiti da sludge e acqua (da considerare successivamente con fase fluida). La quantità in peso di sludge è nota e, conoscendo la massa volumica apparente, è possibile calcolarne il volume. Detraendo il volume di sludge da quello dei vuoti della miscela RAP-sabbia è possibile definire il volume dei vuoti intergranulari residui, i quali sono saturati con una determinata percentuale di acqua. In Tabella 5.5 si riporta il confronto, per la miscela Mix1-P, tra Funk e Dinger (in peso) e tavola a scosse (in volume).

Tabella 5.5 Mix1-P - Confronto Funk e Dinger e Tavola a scosse

| Composizione (-) | RAP (%) | Sludge (%) | Sabbia (%) | Vuoti (%) |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| In peso – F&D | 65 | 25 | 10 | - |
| In volume – tavola a scosse | 60 | 21 | 8 | 11 |

In conclusione, la miscela Mix1-P si satura introducendo un volume di acqua pari all'11% del volume totale, che convertito in peso equivale al 5% sul peso di aggregati secchi.

Lo stesso procedimento è stato applicato per la miscela Mix2-P la cui composizione, ai fini della determinazione della percentuale dei vuoti ottenuta con la tavola a scosse, equivale a una miscela costituita dal 100% di RAP alla quale corrisponde una percentuale di vuoti intergranulari pari a 34.1%. In Tabella 5.6 si riporta il confronto, per la miscela Mix2-P, tra Funk e Dinger (in peso) e tavola a scosse (in volume).

Tabella 5.6 Mix2-P - Confronto Funk e Dinger e Tavola a scosse

| Composizione (-) | RAP (%) | Sludge (%) | Sabbia (%) | Vuoti (%) |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| In peso – F&D | 70 | 30 | - | - |
| In volume – tavola a scosse | 66 | 25 | - | 9 |

In conclusione, la miscela Mix2-P si satura introducendo un volume di acqua pari a al 9 % del volume totale, che convertito in peso equivale al 4% sul peso di aggregati secchi.

I contenuti d'acqua derivanti dalla prova di spandimento e dalla tavola a scosse per la miscela Mix1-P sono nettamente differenti e pari al 20% e 5% sul peso di aggregati secchi, rispettivamente. Analogamente per la miscela Mix2-P la fase fluida da considerare è del 18% e 4% ottenuta con prova di spandimento e tavola a scosse, rispettivamente.

In analogia a quanto effettuato per la prova di spandimento, il contenuto d'acqua della tavola a scosse deve essere trasformato in fase fluida. Il 5% di fase fluida è stato ripartito nel modo seguente: 4% acqua e 1% emulsione in modo che il rapporto acqua/emulsione derivante dalla prova di spandimento (16/4) sia mantenuto costante.

5.1.4 Curve di compattazione e caratteristiche volumetriche

Si confezionano una serie di provini cilindrici con pressa a taglio giratoria per entrambe le miscele oggetto della pre-sperimentazione, Mix1-P e Mix2-P, variando il contenuto e la tipologia di fase fluida, determinata sia con la prova di spandimento e sia con tavola a scosse.

Al termine della compattazione i provini sono essiccati in stufa a 40°C fino al raggiungimento di massa costante. Completato il processo di maturazione (condizione dry), si utilizza il metodo Corelok per determinare la percentuale di vuoti finali, riportati in Tabella 5.7.

Tabella 5.7 Caratteristiche volumetriche – Mix1-P e Mix2-P

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | Acqua (%) | Emulsione bituminosa (%) | Vuoti finali (%) | Vuoti d'acqua (%) | Vuoti d'aria (%) |
|-----------------|------------------|--------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Mix1-P-5A-200 | 200 | 5.0 | - | 21.1 | 13.7 | 7.4 |
| Mix1-P-4A1E-200 | 200 | 4.0 | 1.0 | 22.3 | 9.9 | 12.4 |
| Mix1-P-5-200 | 200 | 5.0 | 4.0 | 15.0 | 14.2 | 0.8 |
| Mix1-P-16-200 | 200 | 16.0 | 4.0 | 13.5 | 13.5 | 0.0 |
| Mix1-P-20A-100 | 100 | 20.0 | 4.0 | 19.0 | - | - |
| Mix2-P-4A-200 | 200 | 4.0 | - | 25.7 | 8.5 | 17.2 |
| Mix2-P-14-200 | 200 | 14.0 | 4.0 | 23.3 | 19.7 | 3.6 |
| Mix2-P-18A-200 | 200 | 18.0 | - | 21.3 | 20.3 | 1.0 |

Per entrambe le miscele, in riferimento ai vuoti finali, si osserva che all'aumentare della fase fluida, tali vuoti si riducono. Questo effetto è associato ad un progressivo aumento del grado di lubrificazione dello scheletro solido con l'aumento della fase fluida che comporta un miglior ingranamento degli aggregati e quindi una riduzione dei vuoti. Il trend appena descritto è molto più marcato per la miscela Mix1-P rispetto a Mix2-P. Infatti, nonostante le miscele siano compattate con fasi fluide nettamente differenti (4% e 18%), i vuoti in tutti i casi risultano elevati (nell'ordine del 20 %). Probabilmente per la miscela Mix2-P-4A-200 la fase fluida impiegata (4%) non è tale da garantire la lubrificazione dei grani con conseguenze negative sull'addensamento. Nelle miscele Mix2-P-18A-200 e Mix2-P-14-200, compattate con fase fluida pari a 18%, i vuoti risultano comunque elevati. In questo caso, è ipotizzabile che l'elevata quantità di sludge trattenga molta acqua durante il processo di compattazione che in condizioni dry, evaporando, si trasforma in vuoti.

Risulta molto interessante anche osservare come l'acqua (proveniente sia dall'emulsione bituminosa che dalla percentuale di aggiunta) si dispone all'interno dei vuoti finali. Si fa riferimento alla condizione umida (condizione wet) che si ottiene al termine del processo di compattazione, in cui i vuoti sono riempiti totalmente da acqua o acqua e aria. In condizione wet, quindi, si parla di vuoti d'acqua e vuoti d'aria. Noto il peso del campione in condizione wet e dry è possibile definire, per differenza, quanta acqua è presente nella miscela al termine della compattazione. Passando dal peso d'acqua al volume d'acqua si definiscono i vuoti d'acqua. I vuoti d'aria sono invece collegati alle caratteristiche fisiche della miscela e si ottengono per differenza tra i vuoti finali e i vuoti d'acqua. I risultati sono riportati in Tabella 5.7.

Si osserva che la miscela Mix1-P-16-200 è completamente satura d'acqua in condizioni wet. Il bitume ovviamente occupa una parte del volume totale ed è presente anche in condizioni dry. La miscela Mix1-P-5A-200 è compattata senza emulsione bituminosa in modo tale da avere un confronto con la miscela Mix1-P-4A1E-200 che presenta la medesima fase fluida ma ripartita tra acqua e bitume. Per queste due miscele l'acqua disponibile non è in grado di saturare i vuoti.

Analogamente, per la miscela Mix2-P-4A l'acqua non è in grado di saturare i vuoti a differenza dei casi in cui l'acqua è presente in maggiori quantità e quindi si può notare un grado di saturazione maggiore.

Per quanto concerne le caratteristiche di addensamento, i dati di compattazione ottenuti con la pressa a taglio giratoria, in combinazione con le caratteristiche volumetriche precedentemente discusse, permettono di studiare l'effetto delle fasi fluide sull'evolvere della compattazione.

Le curve di compattazione della miscela Mix1-P sono riportate in Fig. 5.7.

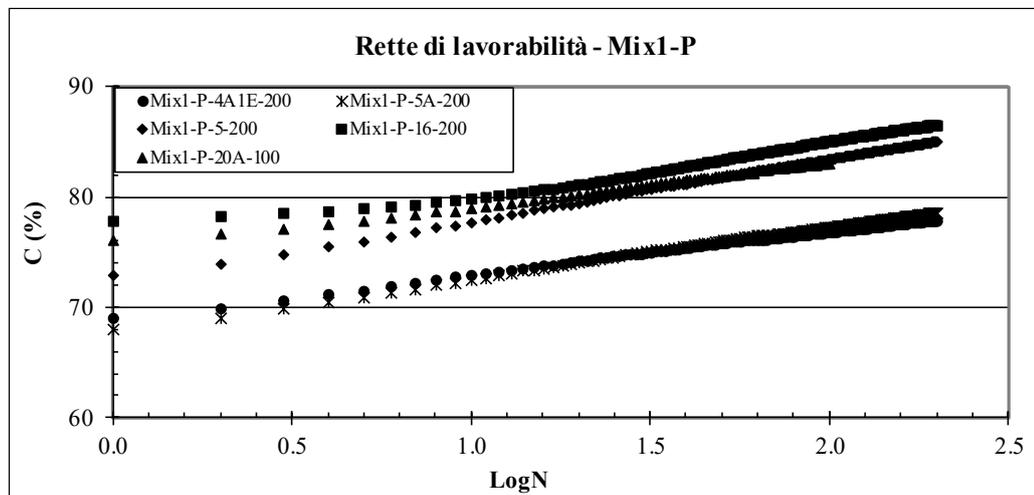


Fig. 5.7 Rette di lavorabilità – Mix1-P

Le miscele compattate con la fase fluida derivante dallo spandimento presentano un trend bi-lineare. Il primo tratto della bilatera è sub-orizzontale con pendenza molto più piccola rispetto al secondo tratto. Questo fenomeno è giustificato a causa dell'elevato contenuto d'acqua che rende complicata, almeno inizialmente, la compattazione. Infatti, l'energia di compattazione iniziale è spesa maggiormente per drenare l'acqua mentre dalla ventesima rotazione in poi l'effetto della compattazione è molto più evidente e comprensibile dal cambio di pendenza della retta di lavorabilità.

Data la bi-linearità di queste curve non si è proceduto a interpolare linearmente i dati a disposizione poiché questo tipo di interpolazione sottostimerebbe il valore di auto-compattazione e non darebbe luogo a valori veritieri della lavorabilità. In virtù di quanto detto, l'auto-compattazione "C₁" è definita in corrispondenza della prima rotazione. Come evidenziato al paragrafo 4.10, la definizione della lavorabilità ha richiesto uno studio più accurato e consiste nel valutare al variare del numero di rotazioni il quantitativo d'acqua drenato. Si è osservato che prima di raggiungere la pressione di costipamento (600 kPa) è drenata più o meno il 25% d'acqua inserita; il drenaggio continua fino alla ventesima rotazione, momento in cui l'acqua drenata è circa il 50 % del totale.

In virtù di quanto osservato, ai fini della lavorabilità delle miscele, si considera la pendenza della retta interpolante la percentuale di compattazione dalla ventesima

rotazione fino al termine della compattazione. La lavorabilità è rappresentata dal parametro “ k_{20} ” e, per completezza, si riporta $C_{1(20)}$, ossia la percentuale di compattazione alla ventesima rotazione e quindi al termine del processo di drenaggio. L’assunzione in questione viene applicata anche alle altre miscele della sperimentazione.

Si riportano in Tabella 5.8 i valori di auto-addensamento (C_1) e di lavorabilità (k_{20}) per la miscela Mix1-P.

Tabella 5.8 Parametri rette di lavorabilità – Mix1-P

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | C_1 (%) | $C_{1(20)}$ (%) | k_{20} (-) |
|-----------------|------------------|--------------|--------------------|-----------------|
| Mix1-P-5A-200 | 200 | 68.0 | 74.0 | 4.5 |
| Mix1-P-20A-100 | 100 | 76.0 | 80.3 | 3.9 |
| Mix1-P-4A1E-200 | 200 | 69.0 | 74.2 | 3.7 |
| Mix1-P-5-200 | 200 | 72.8 | 79.4 | 5.6 |
| Mix1-P-16-200 | 200 | 77.8 | 81.1 | 5.6 |

In generale, si osserva che all’aumentare del contenuto d’acqua, c’è incremento della lavorabilità e dell’auto-addensamento. L’acqua, quindi, favorisce la lubrificazione con conseguenze positive sull’addensamento.

La fase fluida ottenuta mediante prova di spandimento permette di raggiungere valori di C_1 nettamente maggiori rispetto a quella definita mediante la prova alla tavola a scosse. Le miscele compattate con la fase fluida derivante dalla tavola a scosse presentano un basso contenuto d’acqua che influisce negativamente sul valore di C_1 . In termini di lavorabilità, non si osservano sostanziali differenze tra la miscela Mix1-P-5-200 e la miscela Mix1-P-16-200 nonostante queste presentino differenze importanti in termini di contenuto d’acqua.

Per quanto concerne la miscela Mix2-P in Fig. 5.8 sono riportate le rette di lavorabilità ed anche in questo caso si denota che per elevati contenuti di fase fluida la compattazione evolve secondo un trend bi-lineare.

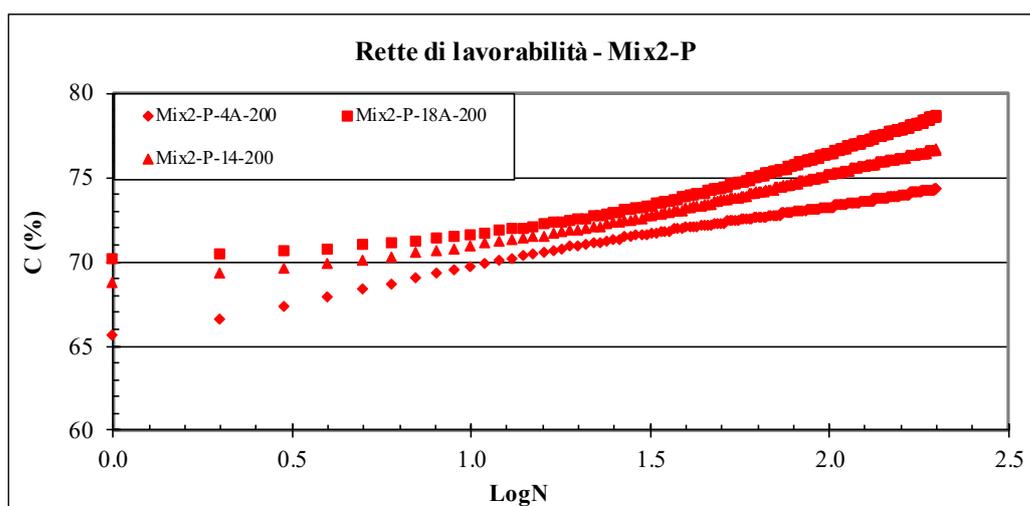


Fig. 5.8 Rette di lavorabilità – Mix2-P

I valori di C_1 e k_{20} sono riportati in Tabella 5.9.

Tabella 5.9 Parametri rette di lavorabilità – Mix2-P

| Miscela | Rotazioni | C_1 | $C_{1(20)}$ | k_{20} |
|----------------|-----------|-------|-------------|----------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (-) |
| Mix2-P-4A-200 | 200 | 65.6 | 70.9 | 3.2 |
| Mix2-P-18A-200 | 200 | 70.2 | 72.6 | 5.8 |
| Mix2-P-14-200 | 200 | 68.8 | 71.9 | 4.7 |

In questo caso, osservando le miscele con la stessa fase fluida Mix2-P-18A-200 e Mix2-P-14-200, si nota che i valori di C_1 e k sono differenti. Queste differenze potrebbero essere dovute alla presenza di emulsione bituminosa che rende più viscosa e quindi più complicata la compattazione della miscela. In conclusione, dai risultati ottenuti, si può affermare che la fase fluida ottenuta con l'approccio alla tavola a scosse non garantisce elevati valori di lavorabilità (k_{20}) e auto-addensamento (C_1) per entrambe le miscele. Inoltre, da un punto di vista teorico, il contenuto d'acqua del 5% che viene applicato alla miscela Mix1-P dovrebbe saturarne completamente i vuoti. In realtà, i provini compattati alla pressa giratoria con questa fase fluida non risultano saturi. Analogamente per la miscela Mix2-P compattata con un contenuto d'acqua pari a 4%.

In virtù di quanto osservato si può dedurre che la tavola a scosse non permette di determinare una sufficiente fase fluida per garantire l'elevata lavorabilità delle miscele e quindi tale approccio non verrà seguito con la sperimentazione.

5.1.5 Modulo di rigidezza

I campioni confezionati con la pressa a taglio giratoria sono poi sottoposti alla prova di modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta. La prova di rigidezza è realizzata su alcuni campioni della miscela Mix1-P. Non è, invece, condotta sui campioni della miscela Mix2-P poiché, ipotizzando l'elevata deformabilità visto l'elevato contenuto di sludge, si sarebbe raggiunta la rottura già in fase di condizionamento. I risultati delle prove condotte sulla miscela Mix1-P sono riportati in Tabella 5.10.

Tabella 5.10 Modulo di rigidezza – Mix1-P

| Miscela | Rotazioni | E' | Vuoti |
|-----------------|-----------|-------|-------|
| (-) | (-) | (MPa) | (%) |
| Mix1-P-5A-200 | 200 | - | 21.1 |
| Mix1-P-20A-100 | 100 | - | 19.0 |
| Mix1-P-4A1E-200 | 200 | 1431 | 22.3 |
| Mix1-P-5-200 | 200 | 1928 | 15.0 |
| Mix1-P-16-200 | 200 | 1755 | 13.5 |

Le prove di modulo di rigidezza evidenziano buone performance meccaniche per le miscele in cui è presente emulsione bituminosa. Per le miscele compattate solo con acqua (prive di emulsione bituminosa) non è stato possibile definire il modulo di rigidezza poiché i campioni hanno raggiunto la rottura già in fase di condizionamento (Fig. 5.9).

Questi risultati mettono in risalto l'importanza dell'emulsione bituminosa poiché senza di essa le performance meccaniche diminuiscono sensibilmente.



Fig. 5.9 Mix1-P-5A-200

5.1.6 Resistenza a trazione indiretta

La prova di resistenza a trazione indiretta è realizzata sugli stessi campioni precedentemente testati con prova di modulo di rigidità. Durante la prova di resistenza a trazione indiretta vengono registrate le coppie di punti forza-spostamento. La Tabella 5.11 riporta, per la miscela Mix1-P, il contenuto di vuoti e il valore di resistenza a trazione indiretta.

Tabella 5.11 RTI – Mix1-P

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | Vuoti (%) | RTI (MPa) |
|-----------------|------------------|--------------|--------------|
| Mix1-P-4A1E-200 | 200 | 22.3 | 0.055 |
| Mix1-P-5-200 | 200 | 15.0 | 0.219 |
| Mix1-P-16-200 | 200 | 13.5 | 0.231 |

I valori di resistenza a trazione indiretta sottolineano l'importanza del contenuto di emulsione bituminosa: la miscela Mix1-P-4A1E-200, preparata con l'1% di emulsione bituminosa, presenta un basso valore di RTI a differenza delle altre preparate con il 4%. È necessario sottolineare che il valore basso di resistenza a trazione indiretta per la miscela Mix1-P-4A1E-200 è da imputare, oltre al basso contenuto di emulsione bituminosa, all'elevata percentuale di vuoti. La prova di resistenza a trazione indiretta per la miscela Mix2-P evidenzia, come nel caso della miscela Mix1-P, l'importanza dell'emulsione bituminosa. Infatti, i campioni senza emulsione bituminosa presentano valori di resistenza a trazione indiretta molto bassi come osservabile da Tabella 5.12.

Tabella 5.12 RTI – Mix2-P

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | Vuoti (%) | RTI (MPa) |
|----------------|------------------|--------------|--------------|
| Mix2-P-4A-200 | 200 | 25.7 | 0.044 |
| Mix2-P-18A-200 | 200 | 21.3 | 0.048 |
| Mix2-P-14-200 | 200 | 23.3 | 0.169 |

5.2 Conclusioni pre-sperimentazione

La fase della pre-sperimentazione ha permesso di definire i protocolli e le tecniche da attuare per raggiungere gli obiettivi prefissati. Di seguito si riportano le osservazioni effettuate in questa fase che sono alla base del programma sperimentale successivamente seguito nella sperimentazione:

- Il modello di Funk e Dinger con $q = 0.21$, utilizzato come riferimento per la definizione dello scheletro litico, permette di conferire alle miscele caratteristiche di elevata lavorabilità e, contemporaneamente, assicura un buon grado di impacchettamento degli aggregati;
- Le miscele preparate senza sabbia (Mix2-P) manifestano scarse performance meccaniche rispetto a quelle con la sabbia (Mix1-P). È quindi necessario impiegare questo tipo di aggregato all'interno delle miscele per incrementare le performance meccaniche. Tutte le miscele della sperimentazione comprenderanno la sabbia;
- La fase fluida definita mediante prova di spandimento permette, grazie all'elevato contenuto di fluido, di raggiungere caratteristiche di auto-addensamento e lavorabilità che soddisfano i requisiti richiesti;
- La fase fluida definita mediante tavola a scosse non permette di raggiungere elevate caratteristiche di auto-addensamento. In virtù di quanto osservato, questa prova non sarà impiegata nella successiva fase di sperimentazione;
- I campioni preparati senza emulsione bituminosa non presentano caratteristiche meccaniche soddisfacenti: è necessario, quindi, utilizzare emulsione bituminosa. Per tutte le miscele della sperimentazione, la fase fluida sarà formata da acqua ed emulsione bituminosa;
- Il contenuto di emulsione bituminosa fisso e pari al 4% è tale da assicurare buone prestazioni meccaniche delle miscele;
- La compattazione alla pressa a taglio girevole fornisce risultati interessanti in termini di C_1 e k_{20} per le miscele preparate con fase fluida derivante dalla prova di spandimento;
- Le prove di modulo di rigidezza e di resistenza a trazione indiretta hanno la sensibilità di riprodurre in maniera accurata la risposta meccanica delle miscele.

5.3 Sperimentazione

Durante la fase di sperimentazione, sulla base dei risultati conseguiti durante la pre-sperimentazione, si è realizzata un'analisi più accurata con l'obiettivo di definire un set di miscele in grado di rispettare i requisiti richiesti.

I risultati conseguiti durante la fase di pre-sperimentazione sono utilizzati come linea guida per la fase di sperimentazione. Infatti, in questa fase, tutte le miscele progettate sono costituite da RAP, sabbia e sludge dato che i risultati della precedente fase hanno sottolineato l'importanza della sabbia per raggiungere adeguate performance meccaniche. Inoltre, tutte le miscele sono preparate con emulsione bituminosa affinché le performance meccaniche risultino soddisfacenti. Analogamente, la prova alla tavola a scosse non è utilizzata in questa fase per via degli scarsi risultati conseguiti in termini di lavorabilità e auto-compattazione durante la fase di pre-sperimentazione.

Si ricorda che la pre-sperimentazione è realizzata con materiali forniti dal committente per altri progetti di ricerca mentre la fase di sperimentazione è realizzata su una nuova fornitura di materiale da parte dello stesso committente. Le curve granulometriche dei materiali impiegati nella fase di sperimentazione sono riportate in Fig. 5.10.

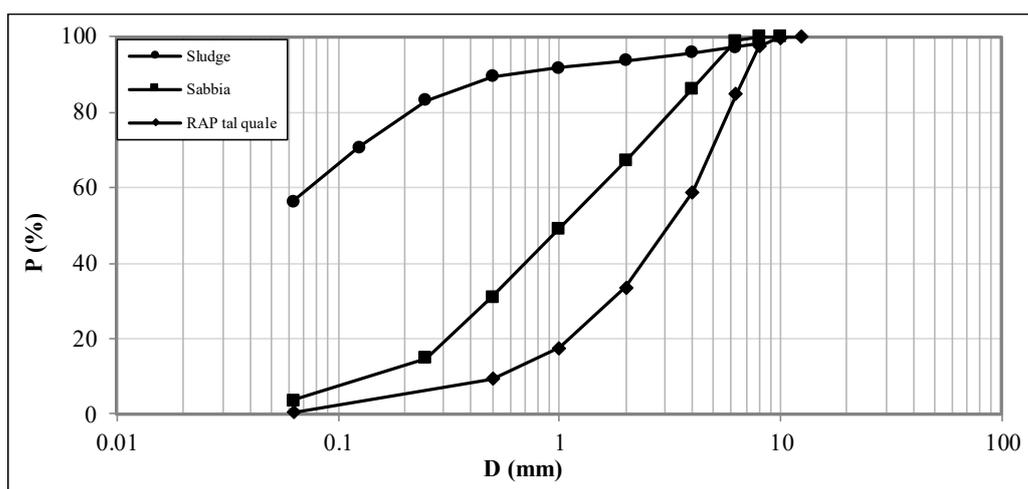


Fig. 5.10 Curve granulometriche materiali – sperimentazione

La miscela Mix1-S, sebbene sia una miscela realizzata durante la fase di sperimentazione, viene trattata separatamente dalle altre tre progettate e testate durante la stessa fase. La miscela in questione è ottenuta impiegando il modello di Funk e Dinger con un valore del fattore di distribuzione “q” pari a 0.21 in analogia a quanto realizzato durante la pre-sperimentazione. Le percentuali di RAP, sabbia e sludge all'interno della miscela sono nettamente differenti rispetto a quelle ottenute durante la pre-sperimentazione. Inoltre, le performance meccaniche di questa miscela non sono minimamente comparabili con quelle osservate durante la fase di pre-sperimentazione. Questo dimostra che i materiali impiegati durante la fase di sperimentazione sono diversi rispetto a quelli utilizzati nella fase precedente.

Mix1-S

Ai fini della definizione dello scheletro solido, la curva granulometrica di progetto è definita con il modello di Funk e Dinger con $q = 0.21$. La curva granulometrica di progetto (F&D) e la curva granulometrica della miscela Mix1-S sono riportate in Fig. 5.11.

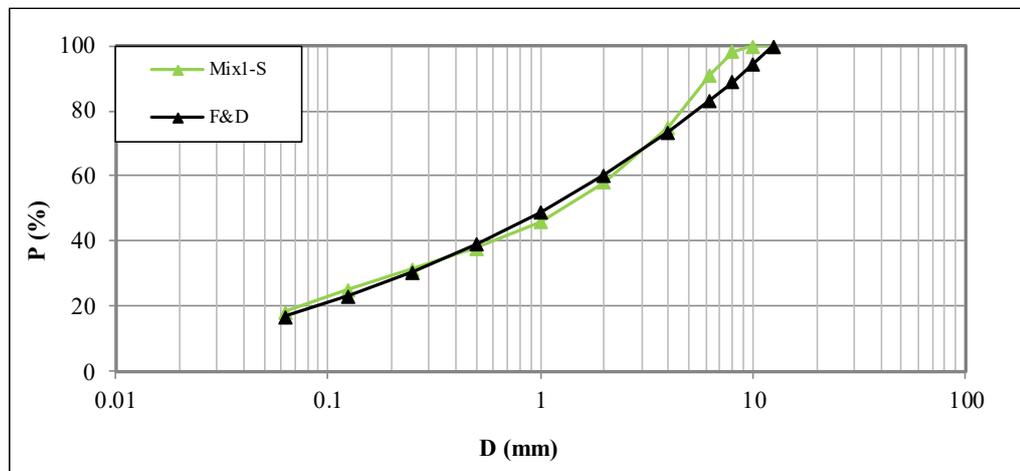


Fig. 5.11 Granulometrie miscele – sperimentazione

La definizione della fase fluida ha richiesto la realizzazione della prova di spandimento, i cui risultati sono riportati in Fig. 5.12.

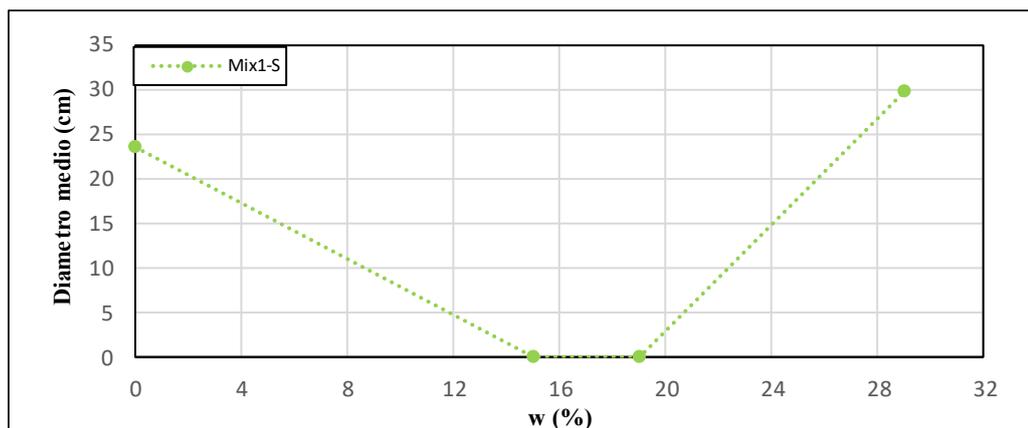


Fig. 5.12 Prova di spandimento – Mix1-S

Il trend di spandimento della miscela Mix1-S può essere suddiviso in tre parti:

- Ramo discendente: lo spandimento diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua. La sludge genera coesione all'aumentare del contenuto di acqua tale per cui la miscela meno coesa spande meno;
- Plateau orizzontale: spandimento nullo;
- Ramo ascendente: lo spandimento aumenta all'aumentare del contenuto d'acqua probabilmente a causa dell'azione di trascinamento dell'acqua.

Gli estremi del tratto a spandimento nullo, rispettivamente 15% e 19%, sono i contenuti di fase fluida con le quali questa miscela viene preparata. I campioni, compattati alla pressa a taglio giratoria con le due fasi fluide derivanti dallo spandimento, sono sottoposti ad analisi volumetriche per la valutazione del contenuto dei vuoti.

I risultati sono riportati in Tabella 5.13 (i valori tra parentesi indicano la deviazione standard).

Tabella 5.13 Caratteristiche volumetriche – Mix1-S

| Miscela | Rotazioni | Acqua | Emulsione bituminosa | Vuoti finali | Vuoti d'acqua | Vuoti d'aria | Acqua p.c. |
|-----------|-----------|-------|----------------------|--------------|---------------|--------------|------------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Mix2-S-11 | 100 | 11.0 | 4.0 | 16.2(1.4) | 16.2 | 0.0 | 8.2 |
| Mix2-S-15 | 100 | 15.0 | 4.0 | 18.6(1.1) | 18.6 | 0.0 | 9.6 |

L'elaborazione dei dati volumetrici ha permesso di osservare che, all'aumentare del contenuto di acqua, i vuoti finali aumentano (condizione dry). La causa di tale effetto è da imputarsi alla sludge poiché è la componente granulometrica che assorbe più acqua in assoluto. Ciò significa che, aumentando la fase fluida, la sludge trattiene molta più acqua al termine della compattazione (condizione wet) la quale si trasforma in vuoti (vuoti finali) dopo il processo di maturazione. Quindi, aumenta la fase fluida, aumenta l'acqua nel sistema ad opera della sludge e quindi più vuoti in condizioni dry. Inoltre, si osserva che in condizioni wet i vuoti sono totalmente saturi di acqua e che all'aumentare della fase fluida aumenta l'acqua trattenuta nel sistema (colonna "Acqua p.c.", valore definito sul peso dello scheletro solido). Come nel caso della pre-sperimentazione, per elevati contenuti d'acqua, le curve di compattazione seguono un andamento bilineare. Dette curve sono riportate in in Fig. 5.13.

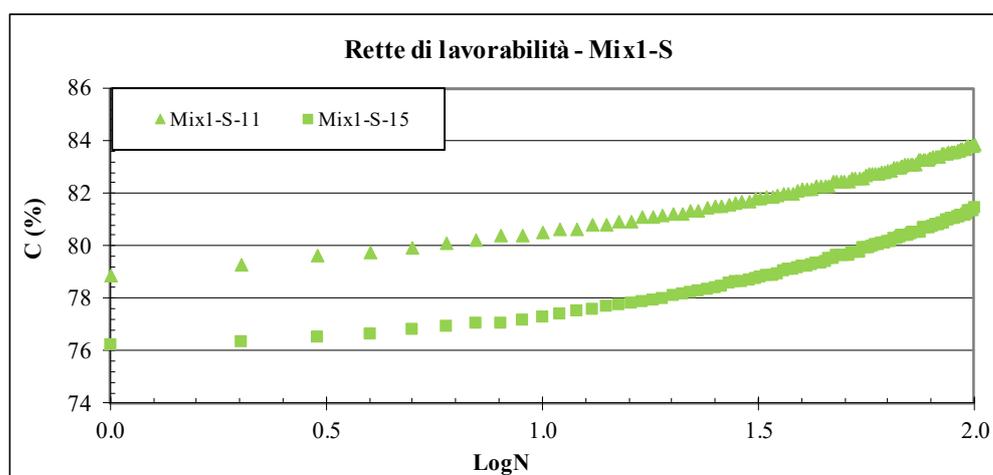


Fig. 5.13 Rette di lavorabilità – Mix1-S

Il primo tratto ha una pendenza minore rispetto al secondo poiché parte dell'energia di compattazione viene impiegata per drenare l'acqua. Al termine del drenaggio, inizia la compattazione dello scheletro solido e l'acqua che non è stata drenata conferisce lavorabilità alla miscela. I valori caratteristici delle rette di lavorabilità sono riportati in Tabella 5.14 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.14 Parametri rette di lavorabilità – Mix1-S

| Miscela | Rotazioni | C ₁ | C ₁₍₂₀₎ | k ₂₀ |
|-----------|-----------|----------------|--------------------|-----------------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (-) |
| Mix1-S-11 | 100 | 78.8(0.6) | 81.2(0.9) | 3.8(0.6) |
| Mix1-S-15 | 100 | 76.2(0.7) | 78.1(0.7) | 4.8(0.5) |

Si osserva la riduzione dell'auto-addensamento "C₁" all'aumentare della fase fluida poiché, dato l'elevato contenuto di fase fluida, l'acqua va in pressione riducendone, almeno inizialmente, l'efficacia della compattazione. La lavorabilità "k₂₀", definita a partire dalla ventesima rotazione, aumenta all'aumentare della fase fluida. Questo effetto è da imputare, probabilmente, a una maggiore quantità di acqua presente all'interno della miscela Mix2-S-15 rispetto alla miscela Mix2-S-11 successivamente al drenaggio. Aumentare l'acqua, quindi, permette di incrementare la lavorabilità.

Da un punto di vista meccanico, la miscela Mix1-S, indipendentemente dal contenuto di fase fluida, mostra scarse performance poiché in nessun caso è stato possibile definire il modulo di rigidezza dei campioni per via della rottura avvenuta già in fase di condizionamento (Fig. 5.14).



Fig. 5.14 Miscela Mix1-S-11

L'unica prova che ha permesso di individuare delle resistenze meccaniche è la prova per la resistenza a trazione indiretta, i cui risultati sono riportati in Tabella 5.15 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.15 RTI – Mix1-S

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | Vuoti (%) | RTI (MPa) |
|----------------|------------------|--------------|--------------|
| Mix1-S-11 | 100 | 16.2(1.4) | 0.125 |
| Mix1-S-15 | 100 | 18.6(1.1) | 0.088 |

Le prove di resistenza a trazione indiretta evidenzia che:

- All'aumentare della fase fluida aumentano i vuoti poiché l'acqua presente al termine della compattazione evapora durante il processo di maturazione;
- Al diminuire della fase fluida, e quindi dei vuoti, la resistenza a trazione indiretta aumenta.

È possibile affermare che le performance meccaniche della miscela Mix1-S non sono tali da garantire il raggiungimento del requisito tecnico e quindi assicurare la funzione strutturale dalla pavimentazione. Probabilmente, la scarsa presenza di RAP e quindi l'elevata presenza di fine influisce negativamente sulle performance meccaniche.

Inoltre, confrontando questi risultati con quelli ottenuti durante la pre-sperimentazione, si osserva che nonostante il valore del parametro di distribuzione del modello sia uguale ($q=0.21$), la composizione e le performance meccaniche sono nettamente diverse. Questo conferma che i materiali impiegati durante la pre-sperimentazione presentano caratteristiche differenti rispetto a quelli impiegati durante la sperimentazione.

Al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati è stato necessario definire nuove miscele incrementando il contenuto di RAP e imponendo che il rapporto tra sludge e sabbia sia pari a 2.5. Per queste miscele la trattazione viene riportata nella stessa forma di quella utilizzata per le miscele della pre-sperimentazione.

5.3.1 Definizione scheletro litico

L'utilizzo di un parametro di distribuzione del modello di Funk e Dinger pari a 0.21 ha portato a una miscela che permette di raggiungere gli obiettivi prefissati (in particolare il requisito tecnico). Affinché possa essere definito un set di miscele che soddisfino tali requisiti, in primo luogo si è “forzato” il modello di Funk e Dinger. Nella fattispecie la composizione dello scheletro litico è assunta uguale a quella definita per la miscela Mix1-P (65% in peso di RAP, 25% in peso di sludge e 10% in peso di sabbia) e il modello di Funk e Dinger è stato impiegato per calcolare a ritroso il valore di “q” che è risultato pari a 0.28. Dopo aver definito questa miscela (denominata in questa fase Mix2-S), si è passato a definire due nuove miscele incrementando il contenuto di RAP a step del 5% e imponendo che il rapporto tra la quantità in peso di sludge e quello di sabbia sia uguale a 2.5.

In Tabella 5.16 si riporta per ogni miscela trattata nella sperimentazione la sua composizione in peso e il valore del parametro di distribuzione del modello “q”. Si ricorda che per la miscela Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S si è fissata la composizione dello scheletro solido e si è calcolato a ritroso il valore di “q”.

Tabella 5.16 Composizione in peso delle miscele della sperimentazione

| Miscela (-) | q (-) | RAP (%) | Sludge (%) | Sabbia (%) |
|----------------|----------|------------|---------------|---------------|
| Mix1-S | 0.21 | 52 | 31 | 17 |
| Mix2-S | 0.28 | 65 | 25 | 10 |
| Mix3-S | 0.32 | 70 | 21 | 9 |
| Mix4-S | 0.36 | 75 | 18 | 7 |

In Fig. 5.15 sono riassunte le curve granulometriche per le miscele Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S.

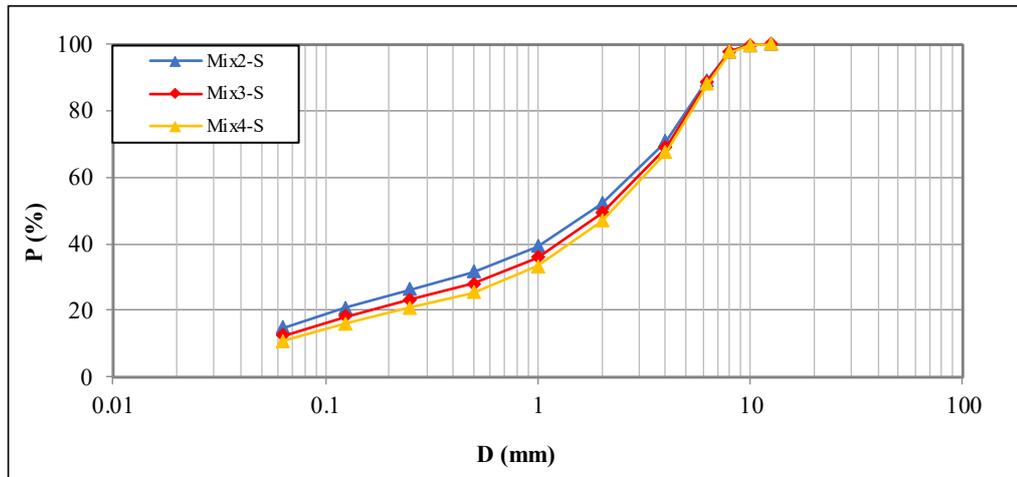


Fig. 5.15 Granulometrie miscele Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S

Si vede come all'aumentare del valore del parametro di distribuzione "q" vi è un incremento della frazione grossolana (RAP aumenta) e le curve granulometriche si orientano verso il basso nel piano di riferimento.

5.3.2 Prova di spandimento

Nella fase di sperimentazione, il contenuto di fase fluida ottimale è definito solo mediante prova di spandimento poiché la fase fluida definita mediante tavola a scosse, impiegata durante la pre-sperimentazione, non permette di soddisfare alcun requisito di lavorabilità, volumetria e performance.

La modalità di realizzazione della prova di spandimento è analoga a quella impiegata durante la pre-sperimentazione e per la miscela Mix1-S.

I risultati della prova di spandimento per le miscele Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S sono riportati in Fig. 5.16.

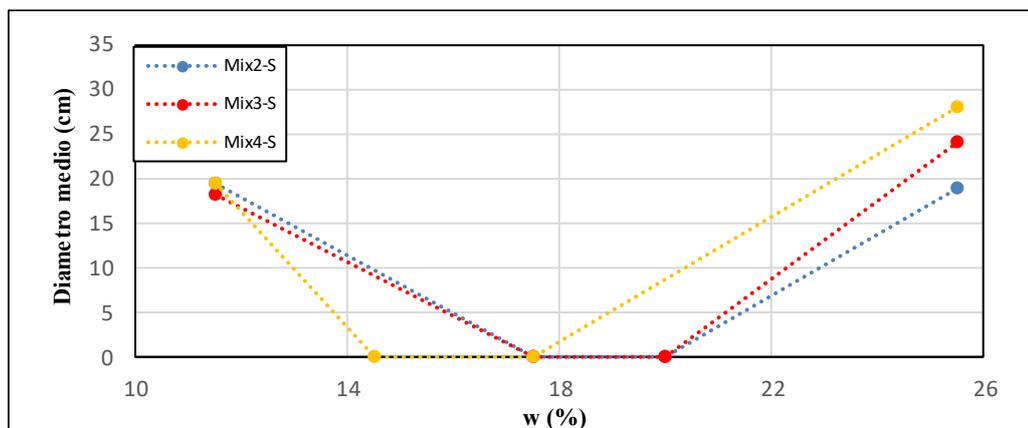


Fig. 5.16 Prova di spandimento – sperimentazione

Si osserva che, all'aumentare del contenuto di sludge, i trend di spandimento si spostano verso destra poiché, data la capacità di assorbimento di questo aggregato, è necessario impiegare contenuti d'acqua maggiori affinché si ottenga la medesima impronta di spandimento. Il trend di spandimento di queste miscele è analogo a quello osservato per la miscela Mix1-S ed è suddividibile in tre parti:

- Ramo discendente: lo spandimento diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua.
- Plateau orizzontale: spandimento nullo;
- Ramo ascendente: lo spandimento aumenta all'aumentare del contenuto d'acqua.

Nel primo tratto (discendente) all'aumentare del contenuto di sludge le rette si spostano verso destra poiché è necessario aggiungere più acqua per ottenere la stessa impronta di spandimento visto l'elevato effetto coesivo che genera la sludge sull'intera miscela. Il secondo tratto (plateau orizzontale) per bassi contenuti di sludge si sposta verso sinistra mentre per contenuti di sludge maggiori sembra sia presente una sovrapposizione del plateau orizzontale indipendentemente dall'effettivo contenuto di sludge.

Il terzo tratto (ascendente) mostra che al diminuire del contenuto di sludge le rette si spostano verso l'alto. Tale effetto potrebbe essere imputato a una quantità di fine inferiore alla quale corrisponde una minore superficie specifica. L'assorbimento d'acqua per le miscele con meno sludge diminuisce e di conseguenza vi è una maggiore quantità di acqua libera che contribuisce, mediante un'azione di trascinamento, ad incrementare la dimensione dell'impronta di spandimento.

Per ogni miscela si evidenzia un tratto a spandimento nullo i cui estremi vengono presi come riferimento ai fini del contenuto di fase fluida ottimale (Tabella 5.17 e Tabella 5.18).

Tabella 5.17 Contenuto d'acqua ottimale - sperimentazione

| Miscela (-) | w (%) | w (%) |
|----------------|----------|----------|
| Mix2-S | 17.5 | 20 |
| Mix3-S | 17.5 | 20 |
| Mix4-S | 14.5 | 17.5 |

Tabella 5.18 Fase fluida ottimale - sperimentazione

| Miscela (-) | FF (%) | FF (%) |
|----------------|-----------|-----------|
| Mix2-S | 13.5A+4E | 16A+4E |
| Mix3-S | 13.5A+4E | 16A+4E |
| Mix4-S | 10.5A+4E | 13.5A+4E |

5.3.3 Curve di compattazione e caratteristiche volumetriche

Definito lo scheletro solido delle miscele, queste sono preparate con le fasi fluide derivanti dallo spandimento e successivamente compattate alla pressa a taglio giratoria. Mediante l'applicazione del metodo Corelok è possibile definire il volume e in seguito la percentuale di vuoti finale e la natura di questi (vuoti occupati dall'acqua in condizione

wet oppure vuoti d'aria) con il procedimento illustrato al paragrafo 5.1.4 (tra parentesi la deviazione standard).

Le caratteristiche volumetriche della miscela Mix2-S sono riportate in Tabella 5.19.

Tabella 5.19 Caratteristiche volumetriche – Mix2-S

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | Acqua (%) | Emulsione bituminosa (%) | Vuoti finali (%) | Vuoti d'acqua (%) | Vuoti d'aria (%) | Acqua p.c. (%) |
|----------------|------------------|--------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| Mix2-S-13.5 | 100 | 13.5 | 4.0 | 16.4(0.3) | 16.2 | 0.2 | 7.8 |
| Mix2-S-16 | 100 | 16.0 | 4.0 | 16.6(0.7) | 14.0 | 2.6 | 6.6 |

I vuoti finali aumentano leggermente all'aumentare della fase fluida poiché il volume occupato dall'acqua in condizione wet si trasforma in volume di vuoti in condizioni dry (stesso effetto osservato per il Mix1-S). Dato che in condizioni wet la miscela non si satura completamente nonostante l'acqua presente dopo la compattazione (acqua p.c.) sia nettamente minore rispetto a quella impiegata inizialmente, è possibile evidenziare una sorta di "limite fisico". Si può affermare quindi che la miscela è in grado di "ospitare" al massimo il 7-8% di fase fluida indipendentemente dal contenuto iniziale.

In Fig. 5.17 sono riportate le rette di lavorabilità, il cui trend assume un andamento bilineare.

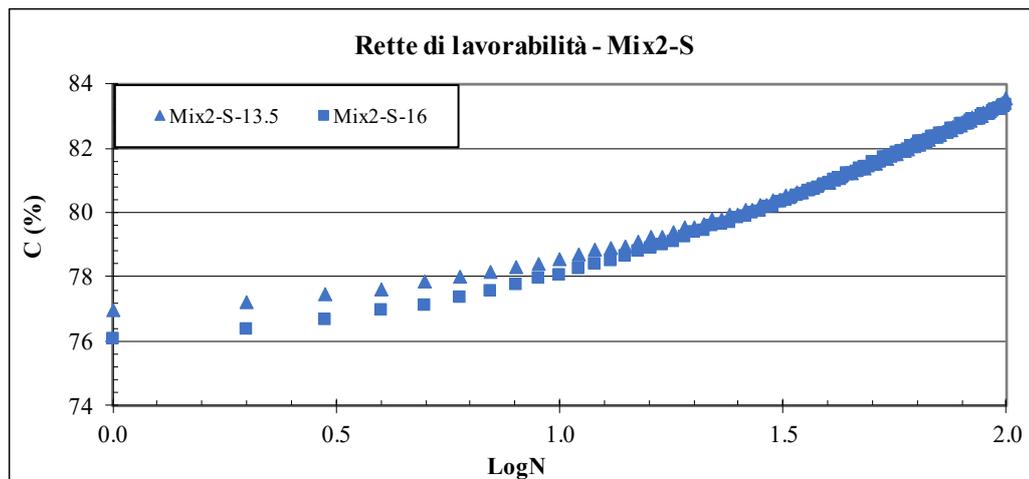


Fig. 5.17 Rette di lavorabilità – Mix2-S

I parametri caratteristici delle rette di lavorabilità per la miscela Mix2-S sono riportati in Tabella 5.20 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.20 Parametri rette di lavorabilità – Mix2-S

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | C ₁ (%) | C ₁₍₂₀₎ (%) | k ₂₀ (-) |
|----------------|------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| Mix2-S-13.5 | 100 | 77.0(0.4) | 79.6(0.4) | 5.2(0.2) |
| Mix2-S-16 | 100 | 76.1(0.1) | 79.4(0.3) | 5.7(0.8) |

Dai risultati emerge che all'aumentare della fase fluida l'auto-compattazione "C₁" diminuisce mentre la lavorabilità k₂₀ aumenta. La riduzione di "C₁" è imputabile ad

una maggiore sovrappressione con l'aumento della fase fluida. Dopo che si sviluppa gran parte del drenaggio (fino alla ventesima rotazione), la miscela con fase fluida più alta avrà al suo interno più acqua che conferirà maggiore lavorabilità.

Le caratteristiche volumetriche della miscela Mix3-S sono riportate in Tabella 5.21 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.21 Caratteristiche volumetriche – Mix3-S

| Miscela | Rotazioni | Acqua | Emulsione bituminosa | Vuoti finali | Vuoti d'acqua | Vuoti d'aria | Acqua p.c. |
|-------------|-----------|-------|----------------------|--------------|---------------|--------------|------------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Mix3-S-13.5 | 100 | 13.5 | 4.0 | 16.6(0.6) | 14.2 | 2.4 | 6.8 |
| Mix3-S-16 | 100 | 16.0 | 4.0 | 15.8(0.6) | 14.9 | 0.9 | 7.1 |

Al contrario di quanto avviene nella miscela Mix2-S, per la miscela Mix3-S l'acqua svolge un effetto lubrificante che influisce positivamente sul contenuto di vuoti. Analogamente a quanto osservato per la miscela Mix2-S, non avviene la completa saturazione dei vuoti in condizioni wet evidenziando una sorta di "limite fisico".

In Fig. 5.18 sono riportate le rette di lavorabilità della miscela Mix3-S.

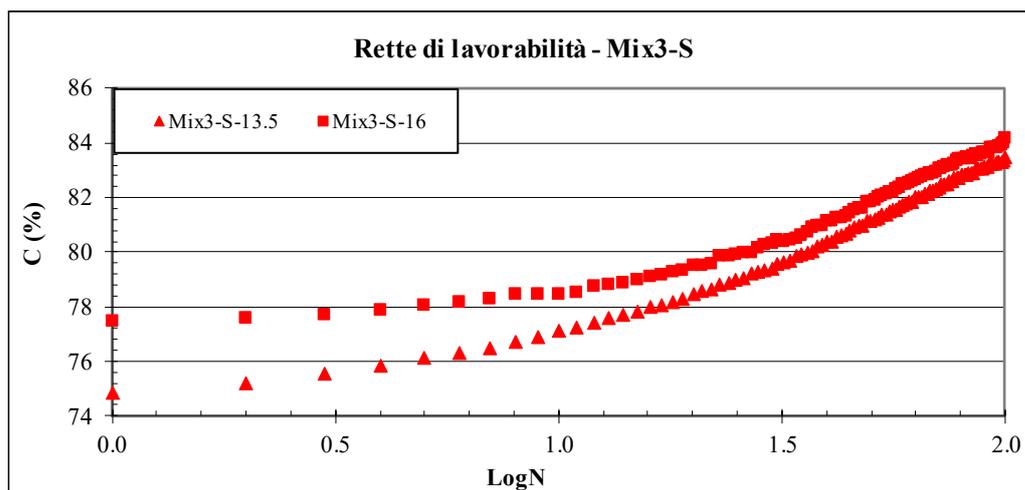


Fig. 5.18 Rette di lavorabilità – Mix3-S

I parametri caratteristici delle rette di lavorabilità per la miscela Mix3-S sono riportati in Tabella 5.22 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.22 Parametri rette di lavorabilità – Mix3-S

| Miscela | Rotazioni | C ₁ | C ₁₍₂₀₎ | k ₂₀ |
|-------------|-----------|----------------|--------------------|-----------------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (-) |
| Mix3-S-13.5 | 100 | 74.8(0.1) | 78.4(0.6) | 7.4(1.8) |
| Mix3-S-16 | 100 | 77.5(0.2) | 79.5(0.5) | 6.8(0.8) |

Si nota che all'aumento della fase fluida incrementa l'azione lubrificante che permette un miglior ingranamento degli aggregati con conseguenze positive sull'auto-addensamento (C₁). La lavorabilità è solitamente legata all'interazione acqua-sludge. Dato il basso contenuto di sludge della miscela Mix3-S, non vi è un'influenza sulla

lavorabilità da parte dell'acqua come nel caso delle miscele Mix1-S e Mix2-S. In virtù di questo motivo, la variazione della lavorabilità non è da imputare al cambiamento della fase fluida.

Le caratteristiche volumetriche della miscela Mix4-S sono riportate in Tabella 5.23 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.23 Caratteristiche volumetriche – Mix4-S

| Miscela | Rotazioni | Acqua | Emulsione bituminosa | Vuoti finali | Vuoti d'acqua | Vuoti d'aria | Acqua p.c. |
|-------------|-----------|-------|----------------------|--------------|---------------|--------------|------------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Mix4-S-10.5 | 100 | 10.5 | 4.0 | 15.7(1.6) | 12.5 | 3.1 | 5.9 |
| Mix4-S-13.5 | 100 | 13.5 | 4.0 | 15.5(0.7) | 15.5 | 0 | 7.6 |

I vuoti diminuiscono lievemente all'aumentare della fase fluida probabilmente grazie a una maggiore presenza di acqua che ne lubrifica i grani. Si vede che il quantitativo di fase fluida per la miscela Mix4-S-13.5 è tale da saturare completamente i vuoti.

Le curve di compattazione riportate in Fig. 5.19 mostrano che all'aumentare della fase fluida aumenta C_1 poiché vi è una maggiore lubrificazione dei grani che ne favorisce la compattazione. Dato il basso contenuto di sludge all'interno della miscela Mix4-S è possibile affermare che la variazione della lavorabilità non è da imputare al cambiamento della fase fluida poiché non vi è interazione tra questa e la sludge stessa.

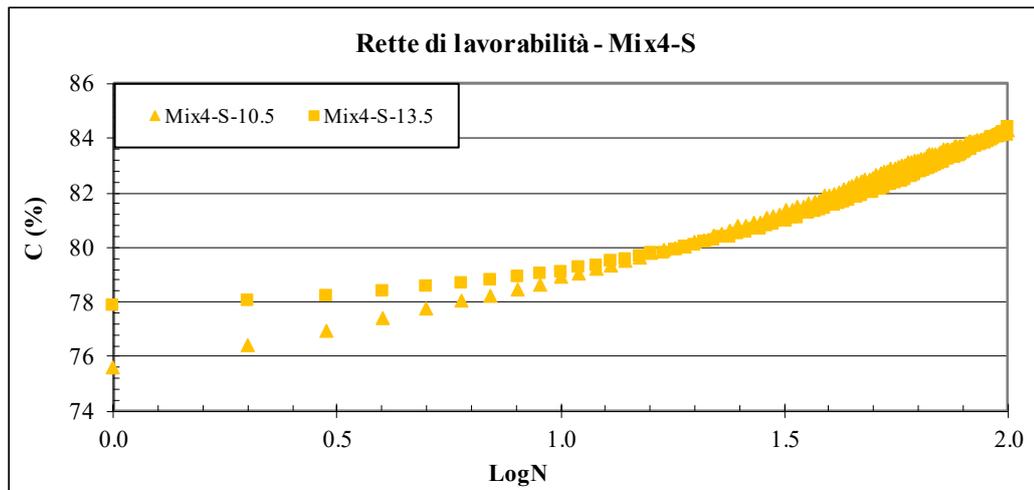


Fig. 5.19 Rette di lavorabilità – Mix4-S

I valori di C_1 e k per la miscela Mix4-S sono riportati in Tabella 5.24 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.24 Parametri rette di lavorabilità – Mix3-S

| Miscela | Rotazioni | C_1 | $C_{1(20)}$ | k |
|-------------|-----------|-----------|-------------|----------|
| (-) | (-) | (%) | (%) | (-) |
| Mix3-S-10.5 | 100 | 75.6(2.1) | 80.2(1.8) | 6.2(0.1) |
| Mix3-S-13.5 | 100 | 77.9(0.5) | 80.1(0.6) | 5.5(0.2) |

In Fig. 5.20 è riportato il legame tra i valori di auto-addensamento e il contenuto di sludge. Si ricorda che ogni miscela è stata preparata con due fasi fluide differenti (ottenute mediante prova di spandimento) a cui corrisponderanno valori di C1 differenti. Nello stesso grafico è riportato per ogni contenuto di sludge il valore medio di auto-addensamento. Il grafico in questione fornisce informazioni relative anche al legame C1-fase fluida poiché, fissato un contenuto di sludge, all'aumentare della distanza dei singoli valori di auto-addensamento dal rispettivo valore medio aumenta la sensibilità di C1 alla fase fluida con la quale la miscela viene preparata.

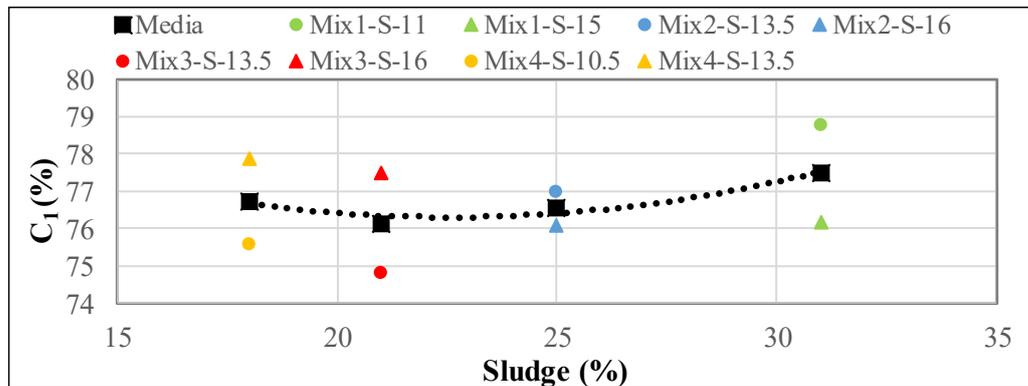


Fig. 5.20 Confronto auto-addensamento, sludge e fase fluida

Nella fattispecie C1:

- Dipende dalla fase fluida con la quale la miscela viene preparata;
- Dipende poco dal contenuto di sludge.

Lo stesso confronto, riportato in Fig. 5.21, è stato effettuato con l'intento di valutare la relazione tra lavorabilità, contenuto di sludge e fase fluida.

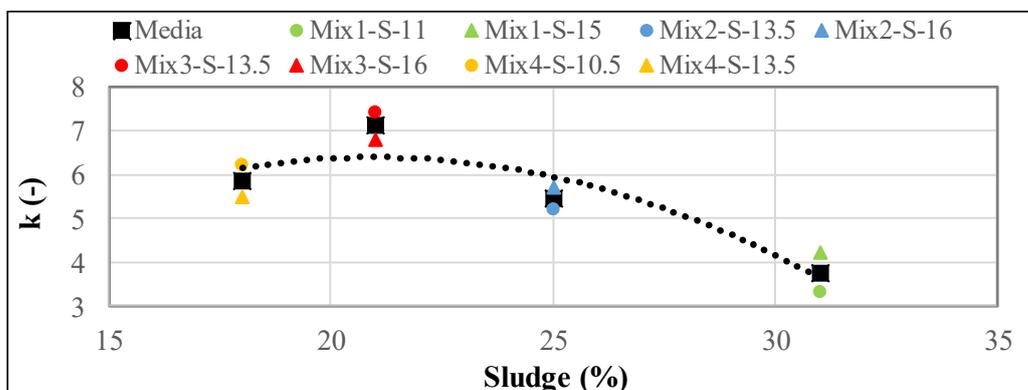


Fig. 5.21 Confronto lavorabilità, sludge e fase fluida

Nella fattispecie la lavorabilità k:

- Per contenuti di sludge maggiori è leggermente influenzata dalla fase fluida con la quale la miscela viene preparata (interazione acqua-sludge);
- Diminuisce all'aumentare del contenuto di sludge.

Analogamente, lo stesso confronto è stato realizzato tra contenuto di vuoti, fase fluida e sludge (Fig. 5.22).

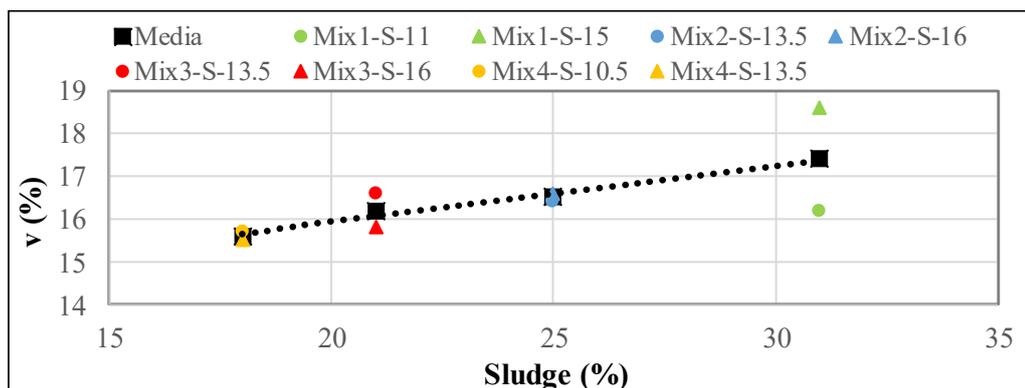


Fig. 5.22 Confronto contenuto di vuoti, sludge e fase fluida

Il contenuto di vuoti aumenta all'aumentare del contenuto di sludge poiché vi è maggiore acqua assorbita che in condizioni dry si trasforma in volume di vuoti.

5.3.4 Modulo di rigidità

I campioni compattati alla pressa a taglio giratoria sono stati sottoposti alla prova di modulo di rigidità in configurazione di trazione indiretta. Si ricorda che il modulo di rigidità è un parametro strutturale che può essere impiegato per la progettazione della pavimentazione. I risultati di questa prova sono riportati in Tabella 5.25 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.25 Modulo di rigidità – sperimentazione

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | E' (MPa) | Vuoti (%) |
|----------------|------------------|-------------|--------------|
| Mix2-S-13.5 | 100 | 978(115) | 16.4(0.3) |
| Mix2-S-16 | 100 | 341(-) | 16.6(0.7) |
| Mix3-S-13.5 | 100 | 975(163) | 16.6(0.6) |
| Mix3-S-16 | 100 | 1006(148) | 15.8(0.6) |
| Mix4-S-10.5 | 100 | 1137(100) | 15.7(1.6) |
| Mix4-S-13.5 | 100 | 1162(22) | 15.5(0.7) |

Per ogni miscela sono presenti due valori di modulo di rigidità ottenuti in funzione delle due diverse fasi fluide con le quali ognuna di queste è stata preparata.

In Fig. 5.23 si riportano i singoli valori di modulo di rigidezza (ottenuti con fase fluida differente) e la media di questi in funzione del contenuto di sludge.

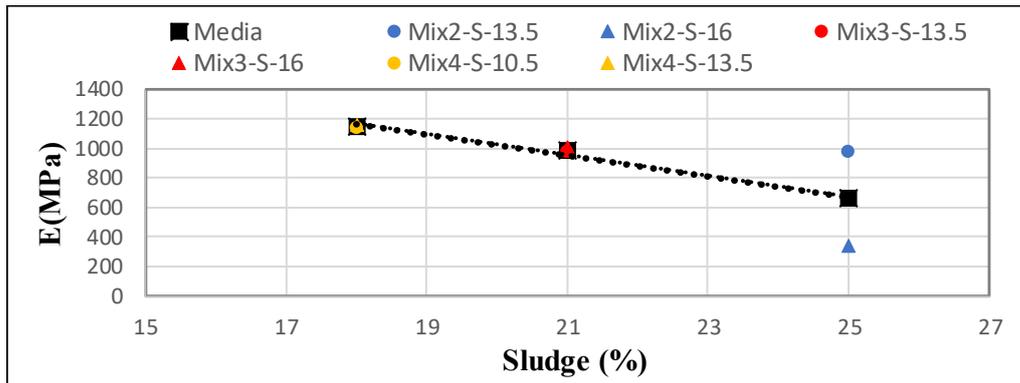


Fig. 5.23 Relazione modulo di rigidezza - sludge

Si vede come all'aumentare del contenuto di sludge (e quindi al diminuire della frazione di RAP) le performance meccaniche decrescono. Inoltre, all'aumentare del contenuto di sludge, le miscele mostrano una maggiore sensibilità alla fase fluida con la quale vengono preparate. Infatti, la differenza tra i due moduli di rigidezza (osservabile dal grafico in termini di distanza tra i due punti a parità di contenuto di sludge) aumenta all'aumentare del contenuto di sludge.

5.3.5 Resistenza a trazione indiretta

Dopo aver realizzato le prove di modulo di rigidezza, gli stessi campioni sono stati sottoposti a una prova di resistenza a trazione indiretta. La resistenza a trazione indiretta (RTI) è un parametro che può essere impiegato per il confronto tra diverse miscele.

I risultati sono riportati in Tabella 5.26 (tra parentesi la deviazione standard).

Tabella 5.26 Resistenza a trazione indiretta – sperimentazione

| Miscela (-) | Rotazioni (-) | RTI (MPa) | Vuoti (%) |
|----------------|------------------|--------------|--------------|
| Mix2-S-13.5 | 100 | 0.158(0.01) | 16.4(0.3) |
| Mix2-S-16 | 100 | 0.121(0.01) | 16.6(0.7) |
| Mix3-S-13.5 | 100 | 0.169(0.04) | 16.6(0.6) |
| Mix3-S-16 | 100 | 0.166(0.04) | 15.8(0.6) |
| Mix4-S-10.5 | 100 | 0.205(0.02) | 15.7(1.6) |
| Mix4-S-13.5 | 100 | 0.203(0.01) | 15.5(0.7) |

Analogamente a quanto effettuato per il modulo di rigidezza, vengono riportati i singoli valori di RTI (per le diverse fasi fluide) e la loro media in funzione del contenuto di sludge (Fig. 5.24).

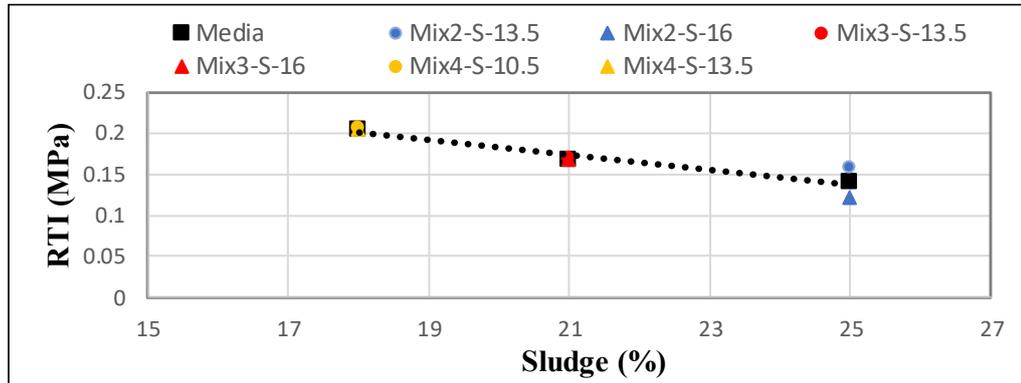


Fig. 5.24 Relazione RTI - sludge

Anche in questo caso si osserva che all'aumentare del contenuto di sludge (e quindi alla diminuzione del contenuto di RAP) le performance meccaniche peggiorano. Analogamente, la sensibilità delle miscele alla fase fluida con la quale essa viene preparata aumenta all'aumentare del contenuto di sludge.

5.3.6 Resistenza all'ormaiamento

Prima di procedere alla compattazione, in accordo con quanto descritto al paragrafo 4.13 deve essere posto all'interno delle lastre il giusto quantitativo di materiale in modo tale da riprodurre le condizioni volumetriche osservate con la pressa a taglio giratoria.

In Tabella 5.27 si riportano le caratteristiche volumetriche e il quantitativo di materiale da inserire nella lastra.

Tabella 5.27 Caratteristiche volumetriche lastre

| Miscela (-) | MVA (kg/m ³) | MV _{geom} (kg/m ³) | v _{geom} (%) | V _{geom-lastra} (m ³) | M (kg) |
|-------------|--------------------------|---|-----------------------|--|--------|
| Mix2-S-16 | 2539 | 2004 | 21.1 | 0.0045 | 9.02 |
| Mix4-S-10.5 | 2532 | 2164 | 14.5 | 0.0045 | 9.74 |

Per ogni miscela si riportano in Tabella 5.28 i quantitativi in peso di ciascuna frazione di materiale.

Tabella 5.28 Frazione in peso di ciascun materiale

| Miscela (-) | RAP (kg) | Sludge (kg) | Sabbia (kg) | Emulsione (kg) | Acqua (kg) |
|-------------|----------|-------------|-------------|----------------|------------|
| Mix2-S-16 | 5.78 | 2.22 | 0.89 | 0.36 | 1.42 |
| Mix4-S-10.5 | 7.20 | 1.73 | 0.67 | 0.38 | 1.01 |

Le Fig. 5.25 e Fig. 5.26 riportano rispettivamente le lastre Mix2-S-16 e Mix4-S-10.5 durante la compattazione e al termine del processo di maturazione.

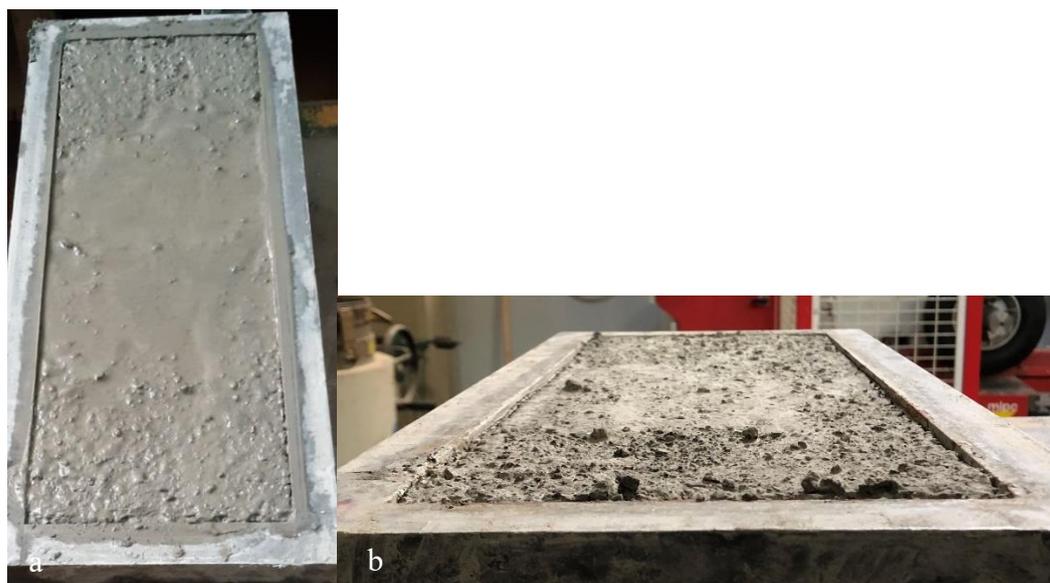


Fig. 5.25 Post-compattazione (a) e post condizionamento in stufa (b) per la miscela Mix2-S-16

È da specificare che la miscela Mix1-S, al termine del processo di compattazione, presenta un avvallamento nella parte centrale che può essere osservato dalla Fig. 5.25b.

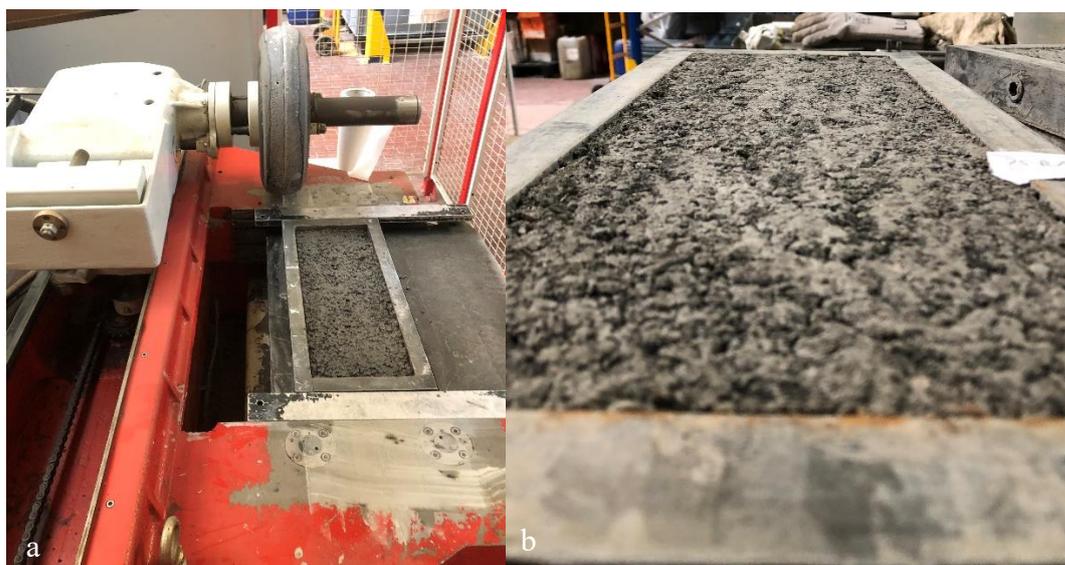


Fig. 5.26 Processo di compattazione (a) e post-compattazione e condizionamento in stufa (b) per la miscela Mix4-S-10.5

Durante il processo di compattazione della miscela Mix1-S-16, l'elevato contenuto d'acqua ne ha reso complicata la compattazione. Infatti, durante questa fase, in seguito al passaggio dello pneumatico, acqua e frazione fine venivano allontanate con conseguente avvallamento nella parte centrale.

Terminato il processo di compattazione, le miscele sono state sottoposte a un processo di maturazione in stufa a 40°C con l'obiettivo di permettere la completa evaporazione dell'acqua presente.

Al termine del processo di maturazione, le miscele sono state sottoposte alla prova di resistenza all'ormaiamento. I risultati sono riportati in Fig. 5.27.

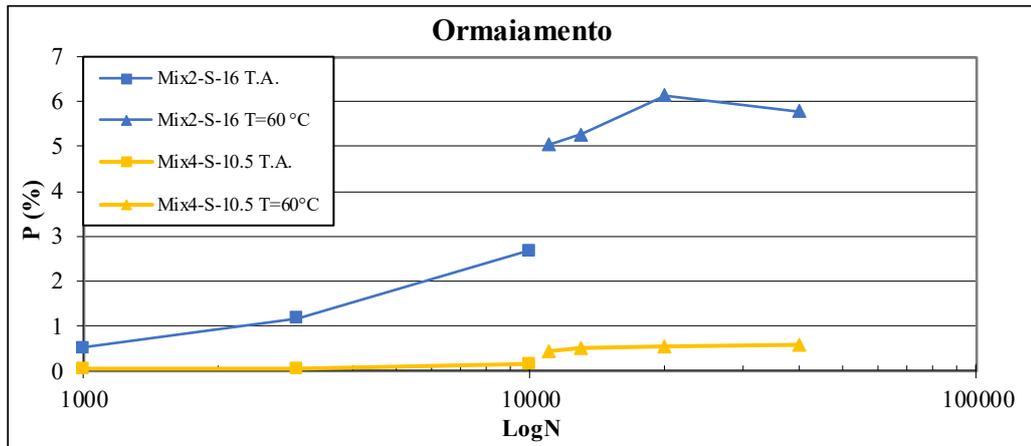


Fig. 5.27 Ormaiamento

Dai risultati ottenuti si osserva che all'aumentare del contenuto di RAP vi è un incremento delle performance meccaniche e una minore sensibilità alle alte temperature della miscela. Infatti, per la miscela Mix2-S (quella che contiene meno RAP), si osserva un salto netto della retta interpolatrice i risultati passando da temperatura ambiente (T.A.) a 60 °C.

5.4 Conclusioni sperimentazione

Nella fase di sperimentazione sono stati impiegati gli strumenti definiti durante la fase di pre-sperimentazione con l'obiettivo di realizzare analisi più precise e accurate. Quattro set di miscele sono state studiate. In questa fase si osserva che:

- L'utilizzo di un valore di "q" pari a 0.21 non permette di ottenere miscele che soddisfano i requisiti meccanici. Allo scopo di soddisfare tali requisiti è necessario incrementare la quantità di RAP all'interno delle miscele. Si è utilizzata dapprima la composizione definita nella pre-sperimentazione e successivamente si è incrementato il contenuto di RAP a step del 5% mantenendo costante il rapporto in peso tra la sludge e la sabbia (2.5);
- La compattazione alla pressa a taglio giratoria evidenzia buoni valori di auto-addensamento e di lavorabilità. La compattazione mediante Roller compactor evidenzia alcune complicazioni quando le miscele presentano un contenuto di fase fluida elevata (Mix2-S-16);
- L'auto-addensamento (C1) varia prevalentemente in funzione del contenuto d'acqua e dipende poco dal contenuto di sludge;
- La lavorabilità (k) delle miscele diminuisce all'aumentare del contenuto di sludge. Inoltre, sembra che questa sia leggermente influenzata dalla quantità d'acqua quando la miscela presenta un elevato contenuto di sludge (vi è interazione acqua-sludge);
- Il contenuto di vuoti aumenta all'aumentare del contenuto di sludge poiché vi è maggiore acqua assorbita che in condizioni dry si trasforma in volume di vuoti;
- All'aumentare del contenuto di RAP e quindi al diminuire della quantità di sludge si osservano performance meccaniche migliori in termini di modulo di rigidezza, resistenza a trazione indiretta e resistenza all'ormaiamento.
- Inoltre, le prove di modulo di rigidezza e di resistenza a trazione indiretta mettono in risalto l'influenza della fase fluida sulle performance meccaniche all'aumentare del contenuto di sludge;
- La prova alla macchina ormaiatrice ha evidenziato una suscettibilità maggiore alle alte temperature delle miscele all'aumentare del contenuto di sludge.

Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di definire un set di miscele innovative composte prevalentemente da materie prime seconde (fresato bituminoso "F" e sludge "SL") con tecnologia a freddo (il legante è l'emulsione bituminosa). Per miscele innovative si intendono miscele sostenibili dal punto di vista ambientale ed economico (elevato riciclaggio, tecnologia di produzione a "freddo" e semplicità di messa in opera) e, contemporaneamente, con caratteristiche meccaniche tali da assicurare coerenti funzioni strutturali per le strade secondarie a basso livello di traffico. La campagna d'indagine si compone di una fase di pre-sperimentazione, seguita dalla fase di sperimentazione.

Uno degli aspetti che conferisce originalità al presente lavoro riguarda l'utilizzo di strumenti non convenzionali per le miscele bituminose riciclate a freddo, come ad esempio il modello di Funk and Dinger, per la definizione della curva granulometrica di progetto, e la prova di spandimento, per la definizione della fase fluida ottimale. Entrambi sono tipici strumenti impiegati per il mix design di miscele cementizie auto-compattanti (*Self Compacting Concrete*). Da qui la necessità di ricorrere alla pre-sperimentazione per collaudare tutti gli strumenti da impiegare successivamente con la sperimentazione, ossia quella fase in cui sono condotti studi più approfonditi per raggiungere gli obiettivi prefissati.

Durante la pre-sperimentazione, le miscele analizzate sono Mix1-P che include anche la sabbia "SA" (65 % F, 25 % SL e 10 % SA) e Mix2-P (70 % F e 30 % SL). La curva granulometrica di progetto è definita con il modello di Funk e Dinger, imponendo il fattore di distribuzione "q" pari a 0.21. Per ciascuna miscela, la fase fluida ottimale è individuata sia con la prova di spandimento sia con la tavola a scosse. Le fasi fluide ottimali così definite sono ripartite in acqua di aggiunta ed emulsione bituminosa, sempre fissa al 4 % sul peso di aggregati secchi per ragioni economiche. Sia per Mix1-P sia per Mix2-P si confezionano due set di provini con la pressa a taglio giratoria. Per il primo set di provini la fase fluida è formata dal 100 % di acqua mentre per il secondo set di provini prevede anche l'emulsione bituminosa. Per tutti i provini confezionati si analizzano le caratteristiche di compattazione (auto-addensamento e lavorabilità) e le proprietà volumetriche (contenuto di vuoti) e meccaniche ("ITSM", modulo di rigidità per trazione indiretta, e "RTI" resistenza a trazione indiretta).

Dalla pre-sperimentazione emerge che:

- è fondamentale includere la sabbia nella costituzione dello scheletro litico;
- la fase fluida deve prevedere anche l'emulsione bituminosa per incrementare le resistenze meccaniche, che decadono se si utilizza solo acqua;
- la fase fluida ottimale determinata con tavola a scosse è insufficiente per garantire elevata lavorabilità delle miscele, a differenza di quanto registrato quando si impiega la fase fluida ottimale ottenuta con prova di spandimento;
- il modello di Funk e Dinger per $q = 0.21$ combina in modo soddisfacente le frazioni granulometriche disponibili;
- con la pressa a taglio giratoria, anche per elevati contenuti di fase fluida, si riescono ad ottenere informazioni sulla lavorabilità;
- le prove meccaniche eseguite (ITSM e RTI) hanno la sensibilità giusta per analizzare le performance meccaniche delle miscele.

In base a quanto emerso con la pre-sperimentazione, si è progettata la miscela Mix1-S (52 % F, 31 % SL e 17 % SA). I risultati ottenuti in termini di lavorabilità, caratteristiche volumetriche e performance meccaniche mostrano un'inaspettata inadeguatezza nel soddisfare gli obiettivi prefissi. Tale condizione è imputabile al cambio di materiali tra le due fasi dell'indagine sperimentale.

Si è deciso, quindi, di costruire altre tre miscele non impiegando il modello di Funk e Dinger per la definizione della curva granulometrica di progetto. La prima miscela è Mix2-S (65 % F, 25 % SL e 10 % SA), costituita dagli stessi dosaggi relativi di fresato bituminoso, sludge e sabbia della miscela Mix1-P. Partendo da Mix2-S, si definiscono le miscele Mix3-S (70 % F, 21 % SL e 09 % SA) e Mix4-S (75 % F, 18 % SL e 07 % SA), incrementando il contenuto di fresato bituminoso a step fissi e tenendo costante il rapporto tra sludge e sabbia pari a 2.5.

La prova di spandimento evidenzia un trend di spandimento in cui si raggiunge un plateau orizzontale, i cui due estremi sono indicati come la fase fluida ottimale per le miscele Mix2-S (17.5 % e 20 %), Mix3-S (17.5 % e 20 %) e Mix4-S (14.5 % e 17.5 %). Le fasi fluide ottimali così definite sono ripartite in acqua di aggiunta ed emulsione bituminosa, sempre fissa al 4 % sul peso di aggregati secchi.

Analizzando le caratteristiche di addensamento delle tre miscele (due fasi fluide ottimali per ciascuna) emerge che:

- le rette di lavorabilità hanno un trend bilineare in cui il cambio di pendenza avviene intorno alla ventesima rotazione. Uno studio realizzato ad hoc ha permesso di osservare che durante le prime venti rotazioni è drenata circa il 50% della fase fluida totale. Quindi, con le prime venti rotazioni l'energia di compattazione è spesa prevalentemente per il drenaggio dell'acqua e che la compattazione vera e propria si sviluppi da tale momento in poi.
- l'auto-addensamento (C_1) delle miscele risulta essere molto più sensibile al variare della fase fluida anziché all'aumentare del contenuto di sludge. In particolare, Mix3-S e Mix4-S presentano un valore di C_1 crescente aumentando la fase fluida (azione di lubrificazione dei grani). Di contro, Mix2-S mostra un valore di C_1 che decresce all'aumentare della fase fluida (maggior sovrappressione dell'acqua nello stadio iniziale della compattazione);
- la lavorabilità k_{20} diminuisce all'aumentare del contenuto di sludge. Infatti, aumenta il contenuto di acqua assorbita e la sludge così imbevuta di acqua, diventa un materiale fangoso, complicandone l'addensamento. A parità di miscela, non si registrano particolari variazioni di k_{20} al variare del contenuto di acqua;
- in definitiva, la fase fluida definita mediante prova di spandimento conferisce elevata lavorabilità alle miscele.

Invece, le caratteristiche volumetriche risultano molto più influenzate dal contenuto di sludge anziché, a parità di miscela, variando la fase fluida. La sludge ha elevata propensione a trattenere acqua durante la compattazione, la quale evaporando totalmente in seguito alla maturazione in stufa, lascerà il posto ai vuoti. Aumentare la sludge significa quindi aumentare l'acqua assorbita, incrementando i vuoti nel materiale secco compattato. In definitiva, risultano molto più soddisfacenti le miscele con quantità di sludge al di sotto del 25 %.

Per quanto concerne le performance meccaniche, si nota un trend simile sia per il modulo di rigidezza (ITSM) che per la resistenza a trazione indiretta (RTI). Per entrambe le prove si registra una riduzione delle performance meccaniche all'aumentare del tenore di sludge. Infatti, diminuendo il fresato bituminoso, le miscele risultano essere meno "rigide" e quindi meno propense a sopportare le sollecitazioni applicate. Inoltre, solo per Mix2-S, si nota l'influenza del contenuto di acqua sia sul modulo di rigidezza sia su RTI. In conclusione, le miscele con performance meccaniche migliori sono quelle che hanno più RAP e meno sludge. Un'ulteriore informazione circa l'effetto della sludge sulle miscele deriva dalla prova di ormaiamento: l'incremento del contenuto di sludge riduce la resistenza all'accumulo di deformazioni permanenti. Inoltre, incrementando la sludge, la miscela è più sensibile alle alte temperature.

Il contenuto di emulsione bituminosa adottato (4% sul peso di aggregati secchi) è tale da garantire soddisfacenti performance meccaniche. Studi più approfonditi saranno eseguiti per denotare l'effetto che ha il dosaggio sulle caratteristiche fin qui analizzate.

In base a quanto emerso dall'analisi tecnica, le tre miscele ottime sono (ordinate per performance meccaniche decrescenti): Mix4-S, Mix3-S e Mix2-S. Bisogna però tener conto dell'effetto che può aver la fase fluida su alcune delle caratteristiche precedentemente illustrate: per la prova di campo si può far riferimento ad un valor medio dei due valori di spandimento. Inoltre, la composizione dello scheletro solido delle tre miscele può essere retrocalcolata con il modello di Funk e Dinger, imponendo valori di "q" compresi tra 0.28 e 0.36 e rapporto tra sludge e sabbia pari a 2.5.

Come si è visto, le tre miscele sono composte da materie prime seconde in quantità prossime al 90 %, e legate tra di loro con emulsione bituminosa. In quest'ottica, e viste le rassicuranti caratteristiche meccaniche, si può concludere che tali miscele sono sostenibili da un punto di vista ambientale. Ovviamente, ulteriori studi sono necessari (ad esempio, definizione del *Life Cycle Assessment* "LCA"). Al tempo stesso, impiegando modeste percentuali di sabbia e ricorrendo alla tecnologia di produzione a "freddo" l'impatto economico risulterà essere decisamente moderato e ulteriormente ridotto vista l'elevata lavorabilità delle miscele progettate.

L'ulteriore conferma che le miscele progettate raggiungono gli obiettivi prefissati sarà fornita dalla sperimentazione di campo, in cui ciascuna miscela sarà impiegata in un campo prove di larghezza 3 m e lunghezza 60 m (ciascuna miscela computa per 20 metri). Tali miscele saranno supportate da un misto granulare di spessore pari a 20 cm, realizzato direttamente sul terreno naturale adeguatamente preparato.

Purtroppo, a causa dell'emergenza sanitaria che affligge l'Italia nel momento in cui questo elaborato è redatto, il campo prove è rinviato ad un momento in cui il nostro Paese verserà in condizioni più serene.

Bibliografia

- [1] R. Douglas, *Low-Volume Road Engineering - Design, Construction, and Maintenance*, CRC Press.
- [2] European Asphalt Pavement Association, *Asphalt in figures 2018*, 2018.
- [3] M. Zaumanis, R. B. Mallicka e R. Frankb, «100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 230-245, 2004.
- [4] C. Damiano, . F. Bolobicchio e V. A. Solimini, «L'utilizzo del 100% del conglomerato bituminoso fresato nel rafforzamento delle pavimentazioni ammalorate,» *Strade & Autostrade*, 2013.
- [5] Asphalt Institute, *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*, 2015.
- [6] C. Giovanini e M. Scarsella, «Simulazione e valutazione dell'invecchiamento del bitume,» *Siteb*.
- [7] F. Santagata, *Strade: Teoria e tecnica delle costruzioni stradali*, Pearson, 2016.
- [8] T. B. Moghaddam e B. Hassan, «The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review,» *Construction and Building Materials*, pp. 805-816, 2016.
- [9] S. Zhao, B. Huang, X. Shu e M. E. Woods, «Quantitative evaluation of blending and diffusion in high RAP and RAS mixtures,» *Materials & Design*, pp. 1161-1170, 2016.
- [10] L. Venturini, «Il fresato: materiale ecosostenibile per miscele bituminose – prima parte,» *Strade&Autostrade*, 2017.
- [11] E. Choorackal, P. P. Riviera, E. Santagata, D. Dalmazzo, L. Zichella e P. Marini, «Performance-Related Characterization of Fluidized Thermal Backfills,» *Waste and Biomass Valorization*, 2018.
- [12] E. Choorackal, P. P. Riviera e E. Santagata, «Mix design and mechanical characterization of self-compacting cement-bound mixtures for paving applications,» *Construction and Building Materials*, 2019.
- [13] G. Keller e J. Sherar, «Best Management Practices Field Guide,» *Low-Volume Roads Engineering*.
- [14] B. Gómez-Meijide e I. Pérez, «Effects of the use of construction and demolition waste aggregates in cold asphalt mixtures,» *Construction and Building Materials*, pp. 267-277, 2014.
- [15] S. Saride, D. Avirneni e S. C. P. Javvadi, «Utilization of Reclaimed Asphalt Pavements in Indian Low-Volume Roads,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016.

- [16] K. Basham, M. Clark, T. France e P. Harrison, «What is fly ash?,» *Concrete Construction*, 2007.
- [17] A. Grilli, A. Graziani, E. Bocci e M. Bocci, «Volumetric properties and influence of water content on the compactability of cold recycled mixtures,» *Materials and Structures*, pp. 4349-4362, 2016.
- [18] Asphalt Academy, Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, 2009.
- [19] S. Fennis e J. Walraven, «Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design».

Ringraziamenti

Mi è doveroso dedicare questo spazio del mio elaborato alle persone che, con il loro instancabile supporto, mi sono state vicine durante il mio percorso universitario.

A mio padre, esempio di forza, coraggio e tenacia. Il mio punto di riferimento e l'uomo che mi ha trasmesso la passione per le discipline scientifiche.

A mia madre che, con amore, ha porto la sua spalla permettendomi di superare i momenti di sconforto.

A mio fratello Samuele che non ha mai fatto mancare l'appoggio e il supporto in ogni mia decisione.

Se oggi sono quello che sono è grazie a voi.

Ringrazio il mio relatore prof. Ezio Santagata e i miei correlatori prof. Davide Dalmazzo, prof. Pier Paolo Riviera e ingegnere Leonardo Urbano, per i preziosi consigli e le giuste indicazioni fornite in ogni fase della realizzazione dell'elaborato.

L'ingegnere Leonardo Urbano, persona con la quale ho lavorato giornalmente fianco a fianco, ha reso meno complicata la realizzazione del progetto di tesi grazie alle sue competenze tecniche e qualità umane che lo contraddistinguono.

Ringrazio, inoltre, il tecnico di laboratorio Riccardo che si è mostrato sempre disponibile ad accogliere qualsiasi richiesta.

Grazie ai miei amici Giuseppe, Danilo, Nicolò e Carmen che, nonostante la delusione iniziale per il cambio di città, hanno sostenuto la mia decisione di cambiare Università standomi vicino in qualsiasi momento.

Un grazie di cuore al mio amico, collega e coinquilino Manuel, con cui ho condiviso il percorso universitario. I consigli, il supporto e i continui confronti hanno permesso di accrescere le mie competenze.

Ringrazio Marco, Ilaria e Davide, i ragazzi con i quali ho vissuto l'esperienza di laboratorio che, tra una risata e l'altra, hanno permesso di alleviare la stanchezza fisica e mentale spesso presente durante le giornate trascorse in laboratorio.

Sono grato ai ragazzi della residenza "Cesare Codegone" che sono entrati a far parte della mia vita nella parte finale del percorso universitario. Qui ho trovato una famiglia costituita da persone stupende sempre pronte a supportarsi e a supportarmi. Non dimenticherò mai le feste, le giornate trascorse in sala TV e le sfide al biliardino in sala giochi che hanno contribuito a rafforzare il nostro rapporto.

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1 Suddivisione in lotti del campo prove | 4 |
| Fig. 1.2 Stratigrafia del campo prove..... | 4 |
| Fig. 2.1 Percentuale di RAP disponibile nei paesi europei [2] | 7 |
| Fig. 2.2 Percentuale di riutilizzo RAP nelle diverse miscele [2] | 8 |
| Fig. 2.3 Costo dei materiali in un riciclato a caldo [3]..... | 9 |
| Fig. 2.4 Fresatrice | 10 |
| Fig. 2.5 Interazione tra il bitume contenuto nel fresato e il legante vergine [8]..... | 11 |
| Fig. 2.6 Processo di rottura emulsione..... | 14 |
| Fig. 2.7 La produzione delle miscele riciclate a freddo [7] | 16 |
| Fig. 2.8 Riciclaggio in situ..... | 17 |
| Fig. 2.9 Riciclaggio in impianto mobile | 18 |
| Fig. 3.1 Programma sperimentale – pre-sperimentazione..... | 28 |
| Fig. 3.2 Programma sperimentale – sperimentazione | 29 |
| Fig. 4.1 Divisore a scomparti | 32 |
| Fig. 4.2 Granulometria RAP tal quale e aggregati estratti | 34 |
| Fig. 4.3 Carbolite | 34 |
| Fig. 4.4 Picnometro con materiale (a) e fase di disareazione (b)..... | 36 |
| Fig. 4.5 Suddivisione del campione in quattro parti (a) e esclusione di due parti opposte (b)..... | 37 |
| Fig. 4.6 Granulometria sludge..... | 38 |
| Fig. 4.7 Granulometria sabbia..... | 39 |
| Fig. 4.8 Comportamento concettuale dei materiali della pavimentazione [18] | 42 |
| Fig. 4.9 Prova di spandimento: tavola e cilindro (a), miscela a elevato contenuto d'acqua (b), miscela in condizione prismatica (c) e miscela assestata su se stessa (d)..... | 46 |
| Fig. 4.10 Tavola a scosse (a) e dettagli costruttivi (b) | 48 |
| Fig. 4.11 Pressa a taglio giratoria..... | 50 |
| Fig. 4.12 Corelok | 52 |
| Fig. 4.13 Nottingham Asphalt Tester (NAT) (a) e configurazione di prova (b)..... | 56 |
| Fig. 4.14 Caratteristiche tenso-deformative di un campione sottoposto alla prova di modulo di rigidità | 57 |
| Fig. 4.15 Pressa statica (a) e configurazione di prova (b)..... | 59 |
| Fig. 4.16 Punti di misura..... | 63 |
| Fig. 5.1 Curve granulometriche materiali – pre-sperimentazione | 66 |
| Fig. 5.2 Granulometrie miscele – pre-sperimentazione | 67 |
| Fig. 5.3 Prova di spandimento – pre-sperimentazione..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Fig. 5.4 Spandimento Mix1-P-20 (a) e Mix2-P-25 (b)..... | 69 |
| Fig. 5.5 Massa volumica – pre-sperimentazione | 69 |
| Fig. 5.6 Contenuto di vuoti – pre-sperimentazione | 70 |
| Fig. 5.7 Rette di lavorabilità – Mix1-P..... | 73 |
| Fig. 5.8 Rette di lavorabilità – Mix2-P..... | 74 |
| Fig. 5.9 Mix1-P-5A-200..... | 76 |
| Fig. 5.10 Curve granulometriche materiali – sperimentazione | 78 |
| Fig. 5.11 Granulometrie miscele – sperimentazione..... | 79 |
| Fig. 5.12 Prova di spandimento – Mix1-S..... | 79 |
| Fig. 5.13 Rette di lavorabilità – Mix1-S..... | 80 |
| Fig. 5.14 Miscela Mix1-S-11 | 81 |
| Fig. 5.15 Granulometrie miscele Mix2-S, Mix3-S e Mix4-S..... | 83 |
| Fig. 5.16 Prova di spandimento – sperimentazione..... | 83 |
| Fig. 5.17 Rette di lavorabilità – Mix2-S..... | 85 |
| Fig. 5.18 Rette di lavorabilità – Mix3-S..... | 86 |
| Fig. 5.19 Rette di lavorabilità – Mix4-S..... | 87 |
| Fig. 5.20 Confronto auto-addensamento, sludge e fase fluida | 88 |
| Fig. 5.21 Confronto lavorabilità, sludge e fase fluida | 88 |
| Fig. 5.22 Confronto contenuto di vuoti, sludge e fase fluida | 89 |
| Fig. 5.23 Relazione modulo di rigidità - sludge..... | 90 |
| Fig. 5.24 Relazione RTI - sludge..... | 91 |
| Fig. 5.25 Post-compattazione (a) e post condizionamento in stufa (b) per la miscela Mix2-S-16 | 92 |
| Fig. 5.26 Processo di compattazione (a) e post-compattazione e condizionamento in stufa (b) per la miscela Mix4-S-10.5..... | 92 |
| Fig. 5.27 Ormaiamento..... | 93 |

Indice delle tabelle

| | |
|--|----|
| Tabella 3.1 Nomenclatura campioni | 30 |
| Tabella 4.1 Massa minima della porzione di prova per aggregati di massa volumica normale | 33 |
| Tabella 4.2 Dimensione del campione di prova..... | 34 |
| Tabella 4.3 Contenuto di legante medio | 35 |
| Tabella 4.4 Valori medi ρ_{mw} per il RAP..... | 36 |
| Tabella 4.5 Valori medi di ρ_{mw} per la sludge..... | 38 |
| Tabella 4.6 Valori medi di ρ_{mw} per la sabbia | 40 |
| Tabella 4.7 Caratteristiche emulsione bituminosa | 41 |
| Tabella 4.8 Valori di “q” per le miscele studiate | 45 |
| Tabella 4.9 Analisi del drenaggio della fase fluida..... | 55 |
| Tabella 4.10 Miscele compattate al compattatore BBPAC | 62 |
| Tabella 5.1 MVA materiali – pre-sperimentazione | 66 |
| Tabella 5.2 Composizione in peso delle miscele della pre-sperimentazione..... | 66 |
| Tabella 5.3 Contenuto d’acqua e fase fluida ottimale..... | 68 |
| Tabella 5.4 Caratteristiche miscele RAP-Sabbia | 70 |
| Tabella 5.5 Mix1-P - Confronto Funk e Dinger e Tavola a scosse..... | 71 |
| Tabella 5.6 Mix2-P - Confronto Funk e Dinger e Tavola a scosse..... | 71 |
| Tabella 5.7 Caratteristiche volumetriche – Mix1-P e Mix2-P..... | 72 |
| Tabella 5.8 Parametri rette di lavorabilità – Mix1-P | 74 |
| Tabella 5.9 Parametri rette di lavorabilità – Mix2-P | 75 |
| Tabella 5.10 Modulo di rigidezza – Mix1-P | 75 |
| Tabella 5.11 RTI – Mix1-P | 76 |
| Tabella 5.12 RTI – Mix2-P | 76 |
| Tabella 5.13 Caratteristiche volumetriche – Mix1-S..... | 80 |
| Tabella 5.14 Parametri rette di lavorabilità – Mix1-S | 80 |
| Tabella 5.15 RTI – Mix1-S..... | 81 |
| Tabella 5.16 Composizione in peso delle miscele della sperimentazione | 82 |
| Tabella 5.17 Contenuto d’acqua ottimale - sperimentazione..... | 84 |
| Tabella 5.18 Fase fluida ottimale - sperimentazione | 84 |
| Tabella 5.19 Caratteristiche volumetriche – Mix2-S..... | 85 |
| Tabella 5.20 Parametri rette di lavorabilità – Mix2-S | 85 |
| Tabella 5.21 Caratteristiche volumetriche – Mix3-S..... | 86 |
| Tabella 5.22 Parametri rette di lavorabilità – Mix3-S | 86 |

| | |
|---|----|
| Tabella 5.23 Caratteristiche volumetriche – Mix4-S | 87 |
| Tabella 5.24 Parametri rette di lavorabilità – Mix3-S | 87 |
| Tabella 5.25 Modulo di rigidezza – sperimentazione | 89 |
| Tabella 5.26 Resistenza a trazione indiretta – sperimentazione..... | 90 |
| Tabella 5.27 Caratteristiche volumetriche lastre | 91 |
| Tabella 5.28 Frazione in peso di ciascun materiale..... | 91 |

ALLEGATO I

Caratteristiche granulometriche



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per
pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALE RAP
CAMPIONE 1

RAP TAL QUALE (Black curve)

CAMPIONAMENTO (-) EN 932-1
SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via secca
MASSA CAMPIONE (g) 1177.5

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| D (mm) | 12.5 | 10 | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 96.8 | 91.5 | 83.0 | 64.3 | 40.2 | 22.1 | 11.1 | 0.7 |

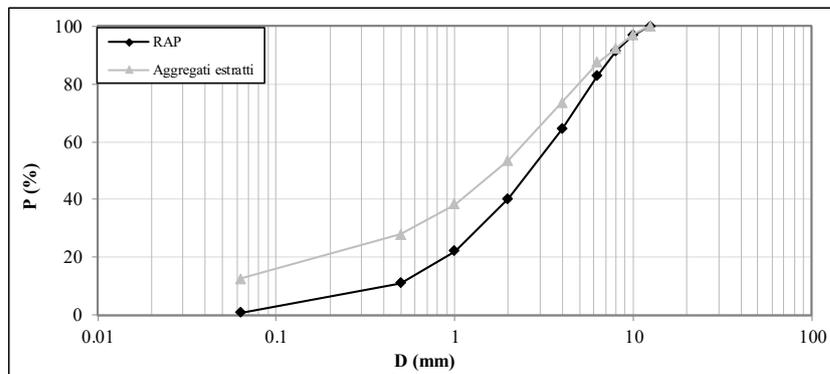
CONTENUTO DI LEGANTE (Black curve) - EN 12697-39

| | | |
|-------------|------------------|------------------|
| Ripetizione | B _{Agg} | B _{Mix} |
| (-) | (%) | (%) |
| 1 | 7.1 | 6.6 |

AGGREGATI ESTRATTI (White curve)

SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via umida
MASSA CAMPIONE (g) 1099.6

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| D (mm) | 12.5 | 10 | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 97.1 | 92.4 | 87.4 | 73.7 | 53.6 | 38.3 | 27.9 | 12.5 |



LEGENDA

P (%) Percentuale di passante
D (mm) Diametro aggregati
B_{Agg}(%) Percentuale di bitume sul peso degli aggregati
B_{Mix}(%) Percentuale di bitume sul peso della miscela

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

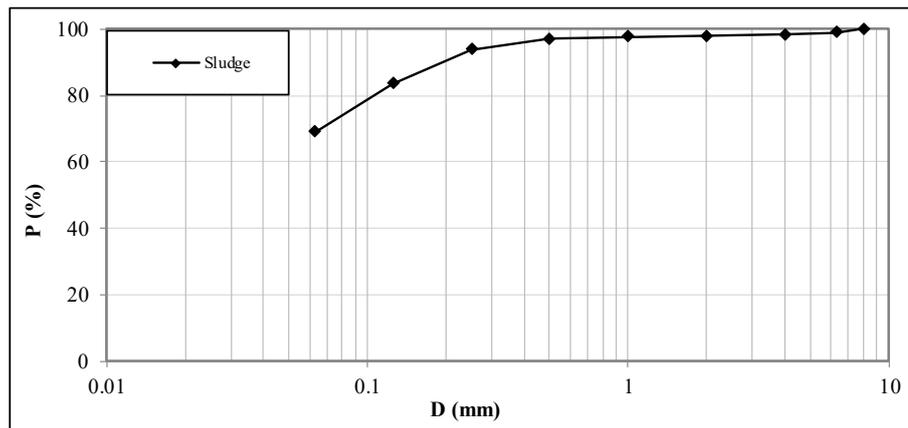
PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per
pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALE Sludge

CURVA GRANULOMETRICA AGGREGATI

CAMPIONAMENTO (-) EN 932-1
SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via umida
MASSA CAMPIONE (g) 355.3

| | | | | | | | | | |
|---------------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| D (mm) | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 | 0.125 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 98.9 | 98.4 | 97.9 | 97.7 | 97.0 | 93.9 | 83.6 | 69.0 |



LEGENDA

P (%) Percentuale di passante
D (mm) Diametro aggregati

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

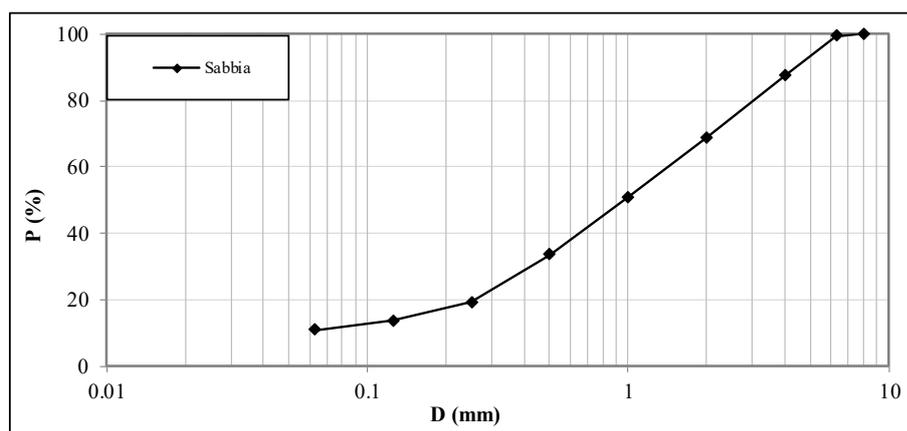
PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per
pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALE Sabbia

CURVA GRANULOMETRICA AGGREGATI

CAMPIONAMENTO (-) EN 932-1
SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via umida
MASSA CAMPIONE (g) 1488.3

| | | | | | | | | | |
|---------------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| D (mm) | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 | 0.125 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 99.4 | 87.4 | 68.8 | 50.9 | 33.7 | 19.3 | 13.8 | 10.9 |



LEGENDA

P (%) Percentuale di passante
D (mm) Diametro aggregati

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALE RAP
CAMPIONE 2

RAP TAL QUALE (Black curve)

CAMPIONAMENTO (-) EN 932-1
SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via secca
MASSA CAMPIONE (g) 2063.4

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|--------|
| D (mm) | 12.5 | 10 | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 99.9 | 97.7 | 84.1 | 57.1 | 32.2 | 17.0 | 9.2 | 0.2035 |

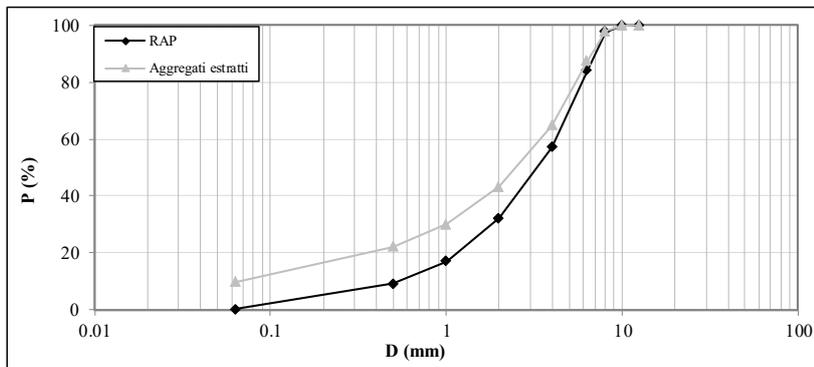
CONTENUTO DI LEGANTE (Black curve) - EN 12697-39

| Ripetizione | B _{Agg} | B _{Mix} |
|-------------|------------------|------------------|
| (-) | (%) | (%) |
| 1 | 5.7 | 5.4 |
| 2 | 6.2 | 5.8 |

AGGREGATI ESTRATTI (White curve)

SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via umida
MASSA CAMPIONE (g) 1931.4

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| D (mm) | 12.5 | 10 | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 99.9 | 97.9 | 87.5 | 64.8 | 43.4 | 30.1 | 22.2 | 9.8 |



LEGENDA

P (%) Percentuale di passante
D (mm) Diametro aggregati
B_{Agg} (%) Percentuale di bitume sul peso degli aggregati
B_{Mix} (%) Percentuale di bitume sul peso della miscela

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

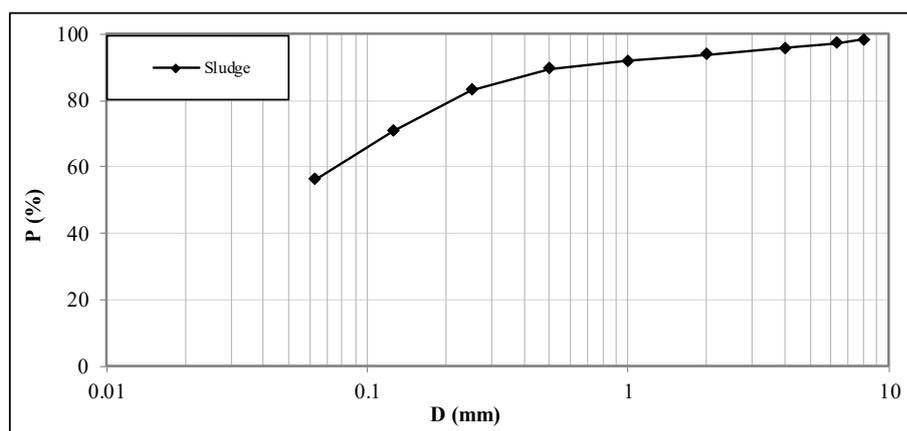
PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALE Sludge

CURVA GRANULOMETRICA AGGREGATI

CAMPIONAMENTO (-) EN 932-1
SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via umida
MASSA CAMPIONE (g) 439.5

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| D (mm) | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 | 0.125 | 0.063 |
| P (%) | 98.3 | 97.3 | 95.8 | 93.8 | 91.9 | 89.5 | 83.1 | 70.7 | 56.3 |



LEGENDA

P (%) Percentuale di passante
D (mm) Diametro aggregati

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

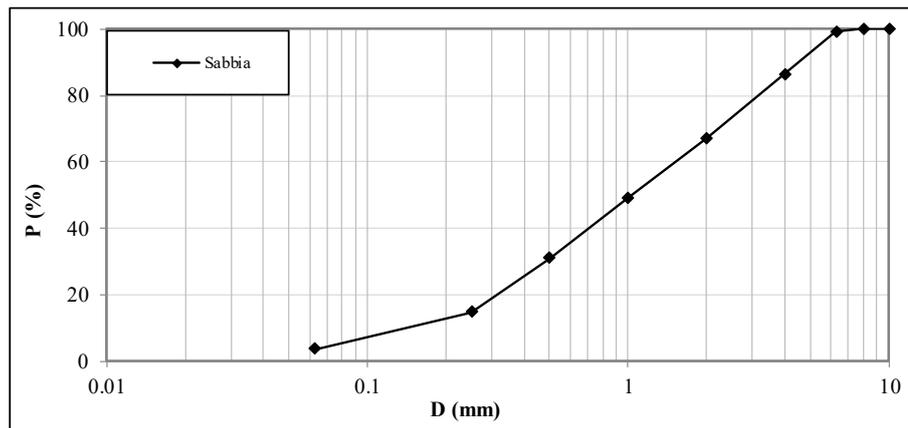
PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALE Sabbia

CURVA GRANULOMETRICA AGGREGATI

CAMPIONAMENTO (-) EN 932-1
SETACCIATURA (-) EN 933-1 - Per via umida
MASSA CAMPIONE (g) 1488.3

| | | | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| D (mm) | 10 | 8 | 6.3 | 4 | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 | 0.063 |
| P (%) | 100 | 100 | 99.1 | 86.3 | 67.1 | 49.1 | 31.1 | 14.8 | 3.7 |



LEGENDA

P (%) Percentuale di passante
D (mm) Diametro aggregati

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo

ALLEGATO II

Rette di lavorabilità



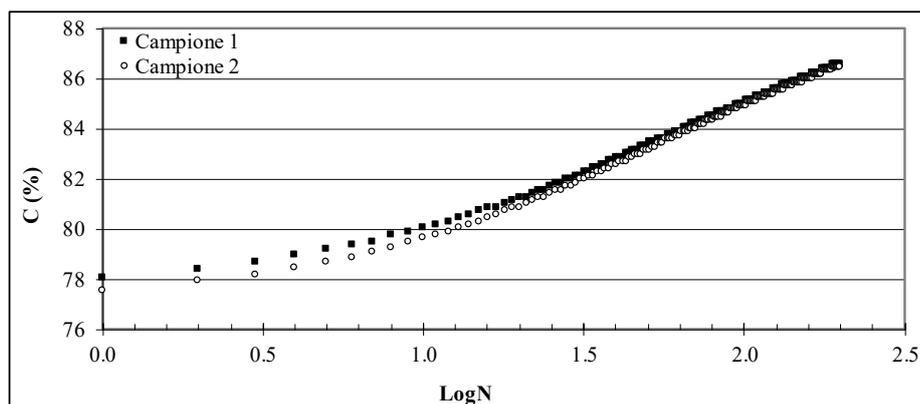
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALI Mix1-P-16-200
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 200 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₂₀₀ |
|----------|------|----------------|------|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 54.1 | 78.0 | 5.55 | 13.5 |
| 2 | 54.7 | 77.5 | 5.89 | 13.5 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₂₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



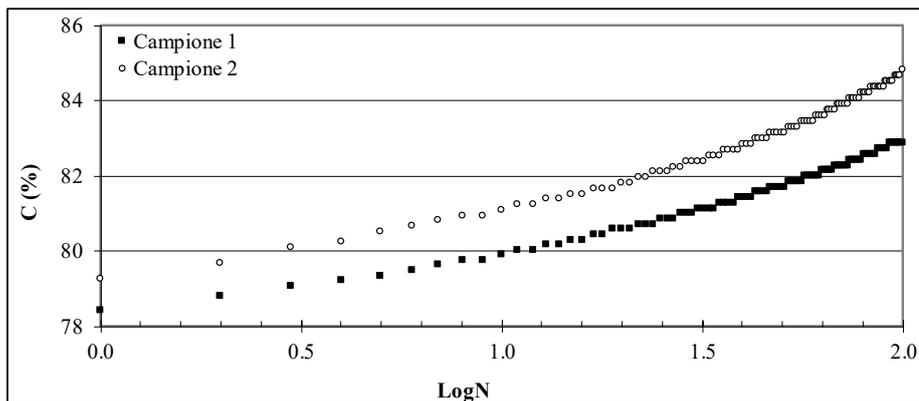
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix1-S-11
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 56.7 | 78.4 | 3.4 | 17.1 |
| 2 | 54.3 | 79.3 | 4.2 | 15.2 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



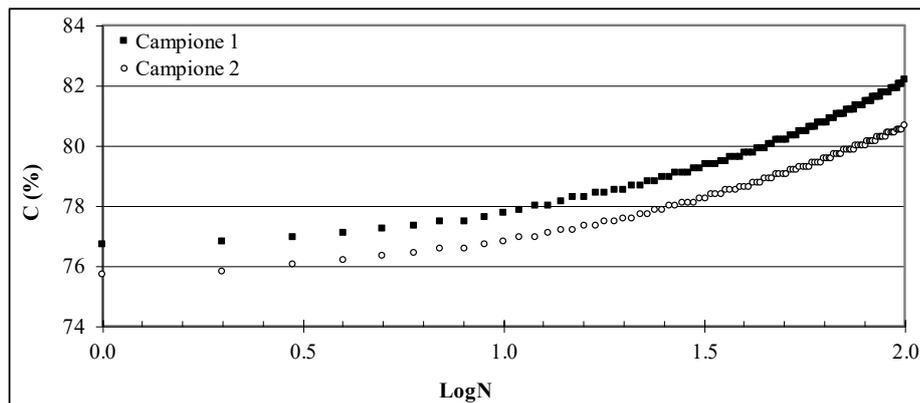
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix1-S-15
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 55.9 | 76.7 | 5.2 | 17.8 |
| 2 | 57.7 | 75.7 | 4.4 | 19.3 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



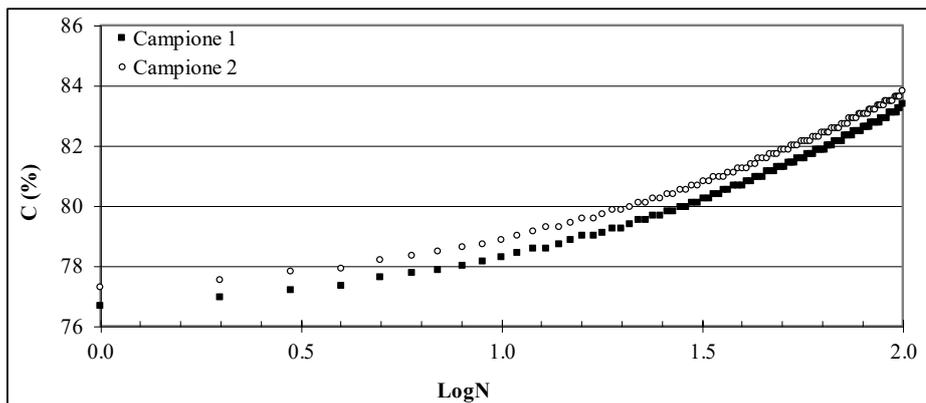
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix2-S-13.5
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 54.2 | 76.7 | 5.4 | 16.6 |
| 2 | 54.9 | 77.3 | 5.1 | 16.2 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



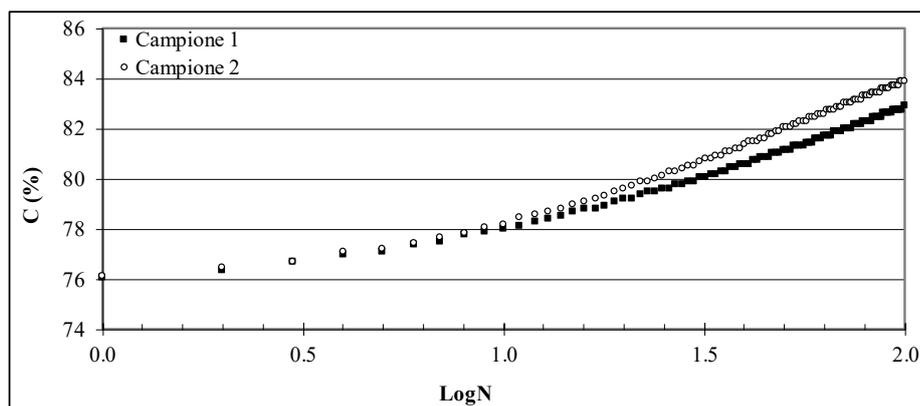
Politecnico di Torino Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix2-S-16
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 55.9 | 76.1 | 5.4 | 17.1 |
| 2 | 57.7 | 76.1 | 6.3 | 16.1 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



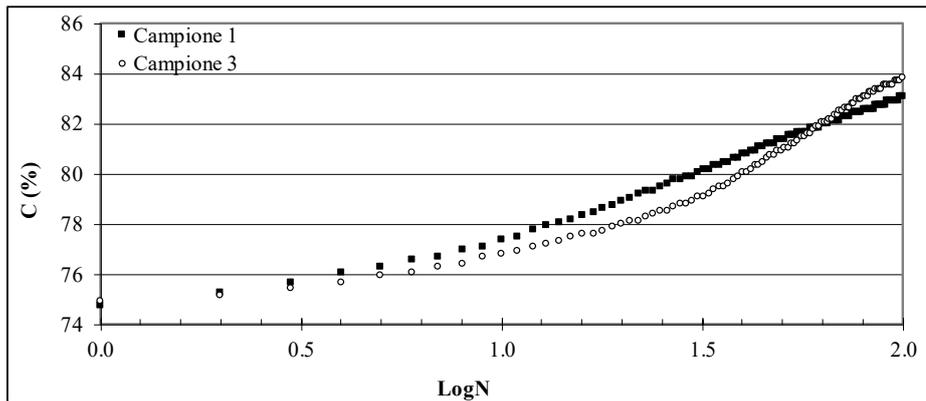
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix3-S-13.5
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 53.1 | 74.7 | 6.1 | 17.0 |
| 3 | 54.6 | 74.9 | 8.6 | 16.2 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



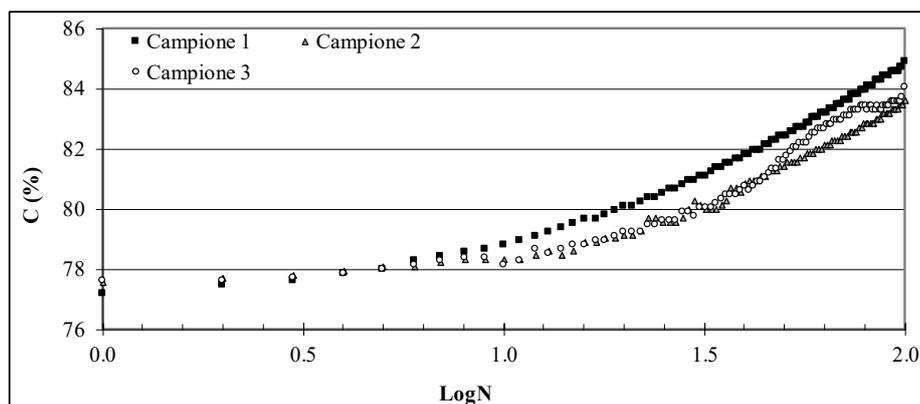
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix3-S-16
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|------|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 53.3 | 77.2 | 6.54 | 15.1 |
| 2 | 55.1 | 77.6 | 6.2 | 16.4 |
| 3 | 54.0 | 77.6 | 7.72 | 16.0 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione $C=MV/TMD$
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



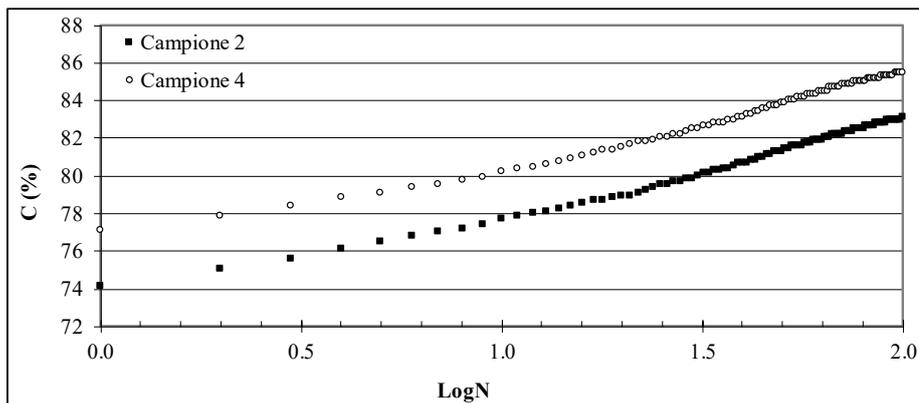
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix4-S-10.5
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 2 | 52.9 | 74.2 | 6.3 | 16.9 |
| 4 | 54.0 | 77.1 | 6.2 | 14.5 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione C=MV/TMD
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



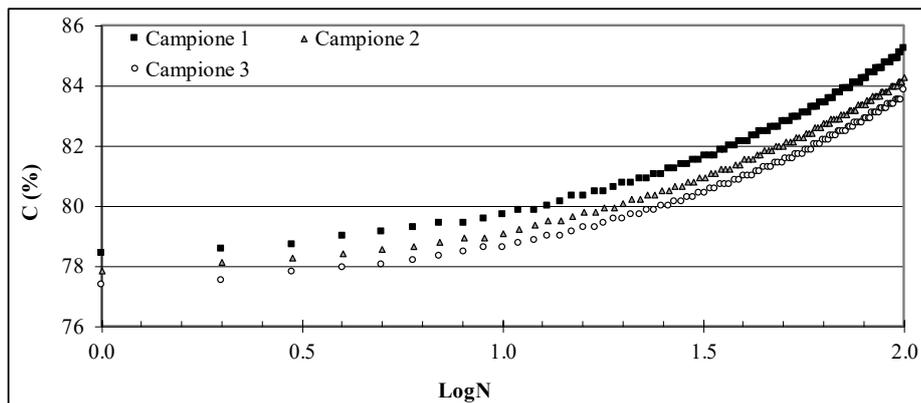
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix4-S-13.5
MISCELAZIONE manuale a freddo
COMPATTATORE Pressa a taglio giratoria - Pine Instrument

PARAMETRI DI COMPATTAZIONE - EN 12697-31

| | | |
|------------------------------------|-----------------|------|
| DIAMETRO FUSTELLA | (mm) | 150 |
| VELOCITA' DI ROTAZIONE | (rotazioni/min) | 30 |
| TEMPERATURA DI COSTIPAMENTO | (°C) | 25 |
| ANGOLO | (°) | 1.25 |
| PRESSIONE DI COSTIPAMENTO | (kPa) | 600 |
| MODALITA' DI COSTIPAMENTO | (rotazioni) | 100 |



| Campione | h | C ₁ | k | v ₁₀₀ |
|----------|------|----------------|-----|------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (-) | (%) |
| 1 | 50.5 | 78.4 | 5.7 | 14.8 |
| 2 | 53.3 | 77.9 | 5.4 | 15.7 |
| 3 | 54.0 | 77.4 | 5.3 | 16.2 |

LEGENDA

C (%) Percentuale di compattazione C=MV/TMD
N Rotazioni
C₁ (%) Auto-compattazione
k (-) Lavorabilità
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
h (mm) Altezza finale del campione

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo

ALLEGATO III

Modulo di rigidezza



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Pre-Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix1-P-4A1E-200 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v ₂₀₀ | MV |
|----------|------|------------------|----------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm ³) |
| 1 | 56.1 | 22.3 | 2.01 |
| 2 | - | - | - |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.99 | 7.1 | 0.693 | 1538 | 1601 |
| Direzione 2-4 | 0.84 | 7.0 | 0.699 | 1323 | 1378 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v ₂₀₀ (%) | Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni |
| MV (g/cm ³) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Pre-Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix1-P-5-200 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (µm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v ₂₀₀ | MV |
|----------|------|------------------|----------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm ³) |
| 1 | 56.7 | 15.0 | 2.11 |
| 2 | - | - | - |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (µm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 1.25 | 7.1 | 0.695 | 1978 | 2067 |
| Direzione 2-4 | 1.21 | 7.0 | 0.682 | 1877 | 1949 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (µm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (µm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v ₂₀₀ (%) | Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni |
| MV (g/cm ³) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Pre-Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix1-P-16-200 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v ₂₀₀ | MV |
|----------|------|------------------|----------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm ³) |
| 1 | 54.1 | 13.5 | 2.14 |
| 2 | 54.7 | 13.5 | 2.14 |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 1.10 | 7.1 | 0.689 | 1784 | 1857 |
| Direzione 2-4 | 1.03 | 7 | 0.687 | 1684 | 1751 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 1.13 | 6.9 | 0.684 | 1829 | 1901 |
| Direzione 2-4 | 1.09 | 7.1 | 0.687 | 1724 | 1792 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v ₂₀₀ (%) | Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni |
| MV (g/cm ³) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix2-S-13.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 1 | 54.2 | 16.6 | 2.12 |
| 2 | 54.8 | 16.2 | 2.13 |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.34 | 4.8 | 0.681 | 810 | 833 |
| Direzione 2-4 | 0.44 | 5.8 | 0.697 | 867 | 898 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.60 | 7.0 | 0.700 | 970 | 1007 |
| Direzione 2-4 | 0.58 | 7.2 | 0.692 | 912 | 943 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix2-S-13.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 3 | 54.8 | 15.9 | 2.14 |
| 4 | - | - | - |

| Campione 3 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.68 | 7.1 | 0.707 | 1084 | 1129 |
| Direzione 2-4 | 0.63 | 7.0 | 0.706 | 1019 | 1060 |

| Campione 4 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix2-S-16 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 1 | 57.1 | 17.1 | 2.10 |
| 2 | - | - | - |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.55 | 17.9 | 0.701 | 333 | 341 |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix3-S-13.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 1 | 53.1 | 17.0 | 2.11 |
| 2 | 52.7 | 18.6 | 2.06 |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.46 | 6.9 | 0.697 | 778 | 804 |
| Direzione 2-4 | 0.46 | 7.2 | 0.701 | 746 | 772 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.49 | 6.8 | 0.698 | 848 | 877 |
| Direzione 2-4 | 0.52 | 6.9 | 0.7 | 887 | 919 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix3-S-13.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 3 | 54.0 | 16.2 | 2.13 |
| 4 | 54.0 | 14.8 | 2.16 |

| Campione 3 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.71 | 7.0 | 0.7 | 1033 | 1073 |
| Direzione 2-4 | 0.67 | 7.4 | 0.695 | 1009 | 1045 |

| Campione 4 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.71 | 7.1 | 0.704 | 1148 | 1196 |
| Direzione 2-4 | 0.67 | 7.2 | 0.706 | 1068 | 1112 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix3-S-16 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 1 | 53.3 | 15.1 | 2.15 |
| 2 | 55.1 | 16.4 | 2.12 |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.66 | 6.8 | 0.714 | 1129 | 1180 |
| Direzione 2-4 | 0.63 | 6.8 | 0.732 | 1078 | 1133 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.53 | 7.2 | 0.697 | 829 | 857 |
| Direzione 2-4 | 0.52 | 7.0 | 0.699 | 836 | 866 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix3-S-16 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 3 | 54.0 | 16.0 | 2.13 |
| 4 | - | - | - |

| Campione 3 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.59 | 7.3 | 0.694 | 928 | 960 |
| Direzione 2-4 | 0.60 | 6.9 | 0.708 | 998 | 1039 |

| Campione 4 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix4-S-10.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 1 | 52.9 | 15.4 | 2.14 |
| 2 | 52.9 | 16.9 | 2.11 |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.62 | 7.0 | 0.705 | 1038 | 1080 |
| Direzione 2-4 | 0.6 | 7.1 | 0.701 | 990 | 1028 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.63 | 6.9 | 0.691 | 1070 | 1108 |
| Direzione 2-4 | 0.62 | 6.8 | 0.702 | 1069 | 1111 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix4-S-10.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 3 | - | - | - |
| 4 | 54.0 | 14.6 | 2.16 |

| Campione 3 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

| Campione 4 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.73 | 6.8 | 0.700 | 1233 | 1283 |
| Direzione 2-4 | 0.71 | 7 | 0.703 | 1165 | 1213 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix4-S-13.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 1 | 50.5 | 14.8 | 2.16 |
| 2 | 53.3 | 15.7 | 2.13 |

| Campione 1 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.66 | 7.1 | 0.699 | 1141 | 1186 |
| Direzione 2-4 | 0.65 | 7.0 | 0.701 | 1140 | 1186 |

| Campione 2 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.69 | 7.1 | 0.718 | 1130 | 1183 |
| Direzione 2-4 | 0.63 | 6.9 | 0.700 | 1062 | 1103 |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

| | |
|--------------------------------|---|
| FASE | Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix4-S-13.5 |
| MISCELAZIONE | manuale a freddo |
| METODO DI COMPATTAZIONE | EN 12697-31 |
| DATA DI PROVA | dopo 3 giorni di maturazione in stufa a 40 °C |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-26 - ANNESSO C

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|
| STRUMENTAZIONE | (-) | Nottingham Asphalt Tester by Cooper Research Technology |
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| COEFFICIENTE DI POISSON | (-) | 0.35 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |
| TEMPO DI PICCO | (ms) | 124 |
| DEFORMAZIONE ORIZZONTALE | (μm) | 7 |
| IMPULSI DI CONDIZIONAMENTO | (-) | 10 |

| Campione | h | v_{100} | MV |
|----------|------|-----------|----------------------------|
| (-) | (mm) | (%) | (g/cm^3) |
| 3 | 54.0 | 16.2 | 2.12 |
| 4 | - | - | - |

| Campione 3 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-------|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | 0.69 | 7.1 | 0.691 | 1116 | 1156 |
| Direzione 2-4 | 0.66 | 6.8 | 0.697 | 1114 | 1157 |

| Campione 4 | F | z | k | E | E' |
|---------------|------|-------------------|-----|-------|-------|
| (-) | (kN) | (μm) | (-) | (MPa) | (MPa) |
| Direzione 1-3 | - | - | - | - | - |
| Direzione 2-4 | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| F (kN) | Carico applicato |
| z (μm) | Deformazione orizzontale |
| k (-) | Fattore di carico misurato |
| E (MPa) | Modulo di rigidezza |
| E' (MPa) | Modulo di rigidezza corretto |
| h (mm) | Altezza campione |
| v_{100} (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| MV (g/cm^3) | Massa volumica |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo

ALLEGATO IV

Resistenza a trazione indiretta



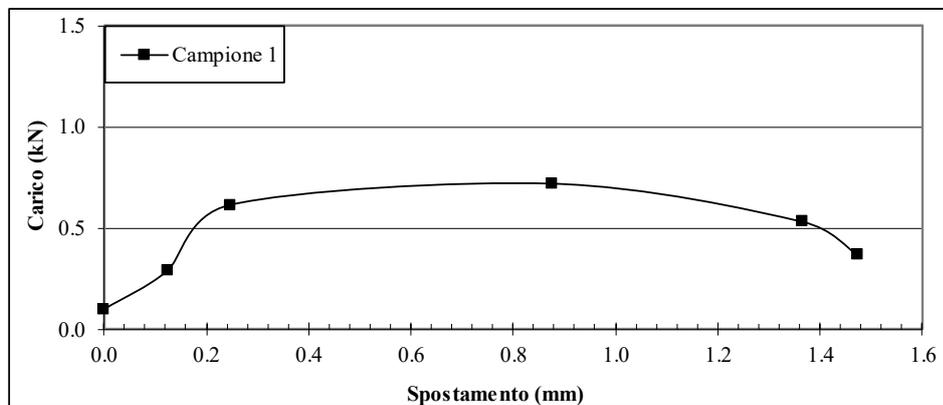
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALI Mix1-P-4A1E-200

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 1
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₂₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 56.1 | 0.72 | 0.877 | 0.055 | 22.3 | A |
| 2 | - | - | - | - | - | - |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₂₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



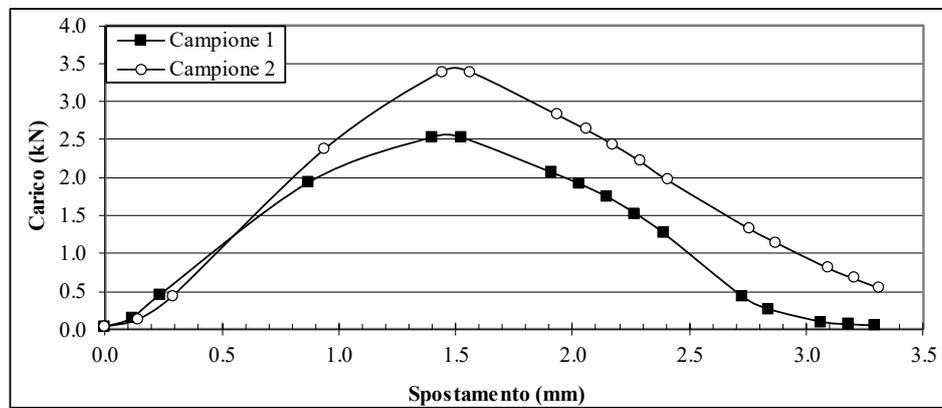
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALI Mix1-P-16-200

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 2
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₂₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 54.1 | 2.53 | 1.397 | 0.199 | 13.5 | A |
| 2 | 54.7 | 3.39 | 1.441 | 0.263 | 13.5 | A |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₂₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



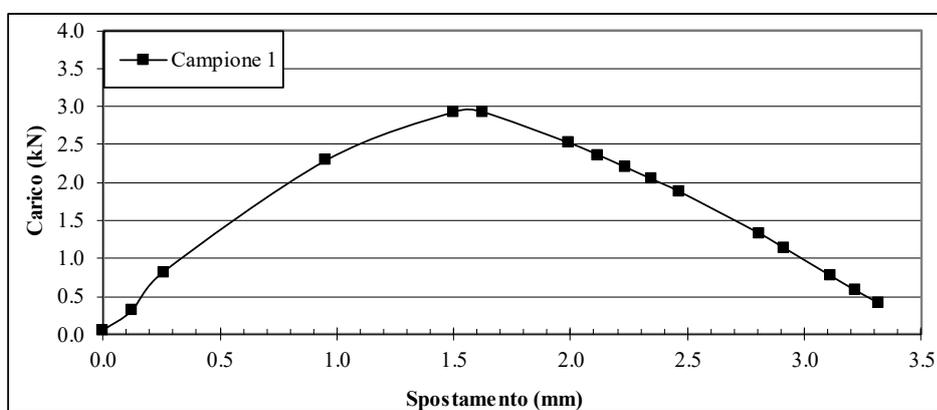
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALI Mix1-P-5-200

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 1
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₂₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 56.7 | 2.93 | 1.501 | 0.219 | 15.0 | A |
| 2 | - | - | - | - | - | - |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₂₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



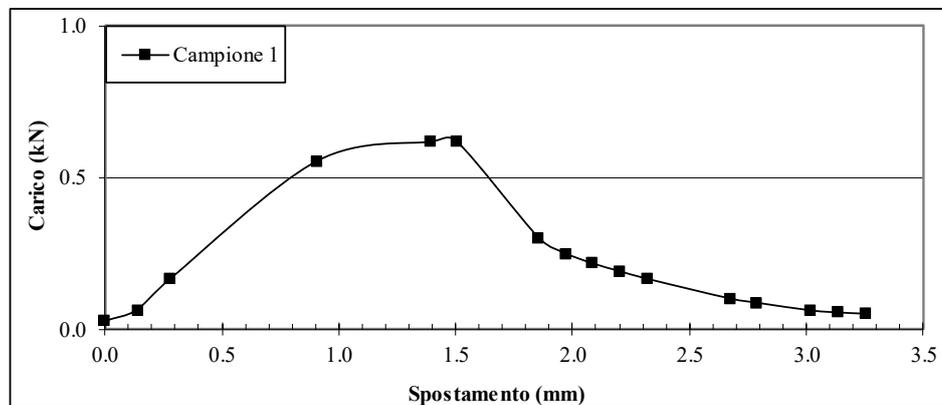
Politecnico di Torino Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALI Mix2-P-4A-200

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 1
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₂₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 59.3 | 0.62 | 1.396 | 0.044 | 25.7 | A |
| 2 | - | - | - | - | - | - |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₂₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



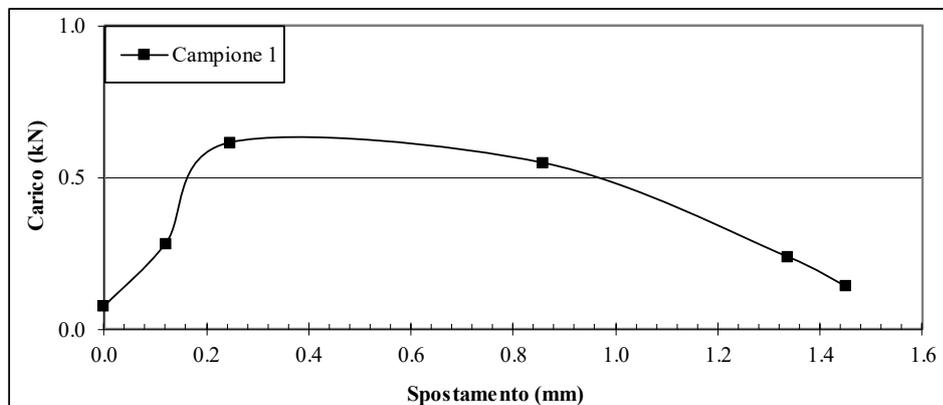
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per
pavimentazioni stradali

| | |
|------------------|---------------------|
| FASE | Pre-Sperimentazione |
| MATERIALI | Mix2-P-18A-200 |

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

| | | |
|-----------------------|-------|----------------------------------|
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| NUMERO PROVINI | (-) | 1 |
| TIPO PROVINO | (-) | Confezionato secondo EN 12697-31 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |



| Campione | h | P | s | RTI | v ₂₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 54.7 | 0.62 | 0.248 | 0.048 | 21.3 | A |
| 2 | - | - | - | - | - | - |

LEGENDA

| | |
|----------------------|---|
| h (mm) | Altezza campione |
| P (kN) | Carico verticale di picco |
| s (mm) | Spostamento in corrispondenza del carico di picco |
| RTI (MPa) | Resistenza a trazione indiretta |
| v ₂₀₀ (%) | Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni |
| Rottura | A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione) |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



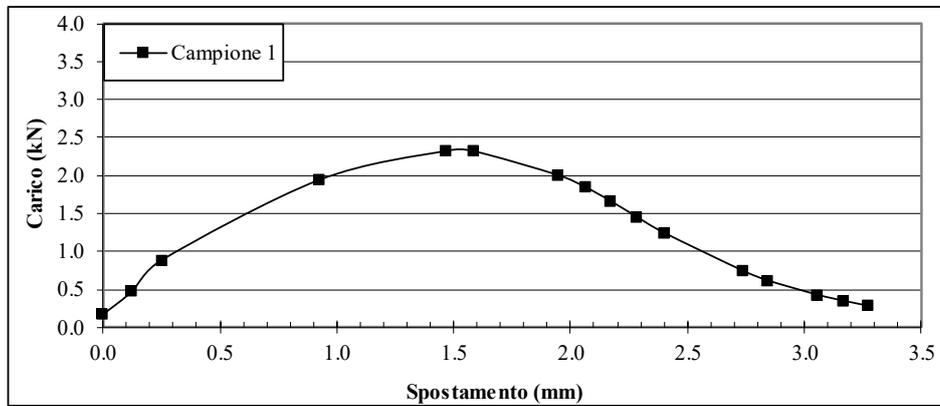
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Pre-Sperimentazione
MATERIALI Mix2-P-14-200

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 1
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₂₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 58.2 | 2.32 | 1.465 | 0.169 | 23.3 | A |
| 2 | - | - | - | - | - | - |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₂₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 200 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



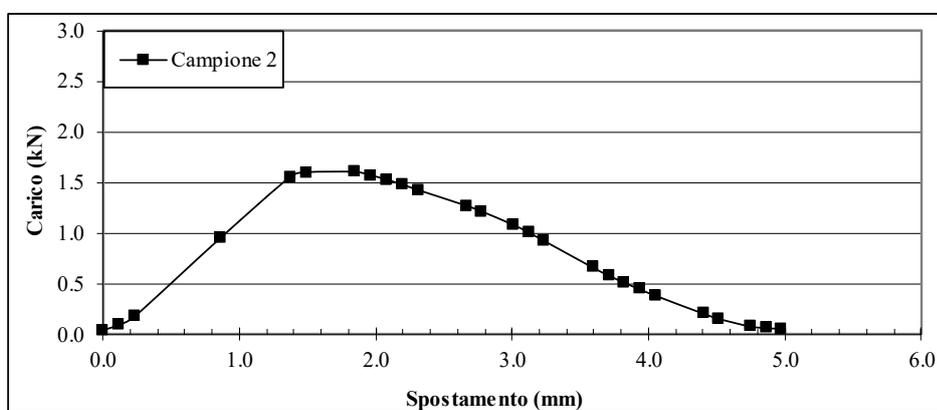
Politecnico di Torino Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix1-S-11

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

| | | |
|-----------------------|------|----------------------------------|
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| NUMERO PROVINI | (-) | 1 |
| TIPO PROVINO | (-) | Confezionato secondo EN 12697-31 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |



| Campione | h | P | s | RTI | v ₁₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | - | - | - | - | - | - |
| 2 | 54.4 | 1.60 | 1.848 | 0.125 | 15.2 | A |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



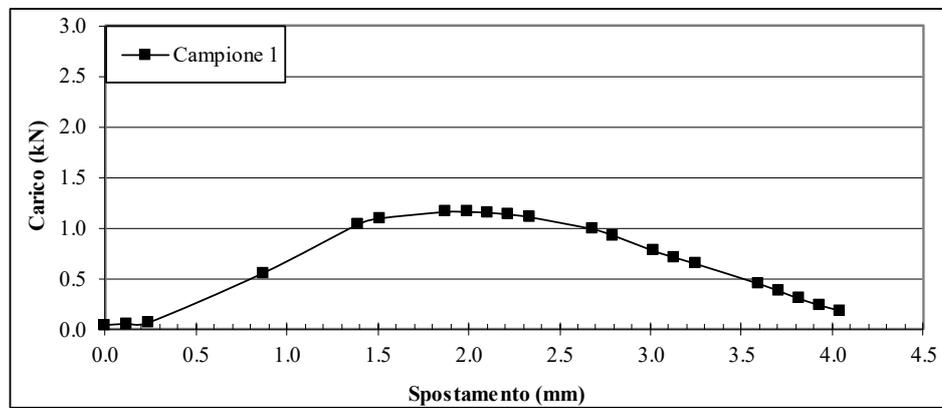
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix1-S-15

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 1
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₁₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 55.9 | 1.16 | 1.872 | 0.088 | 17.8 | A |
| 2 | - | - | - | - | - | - |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



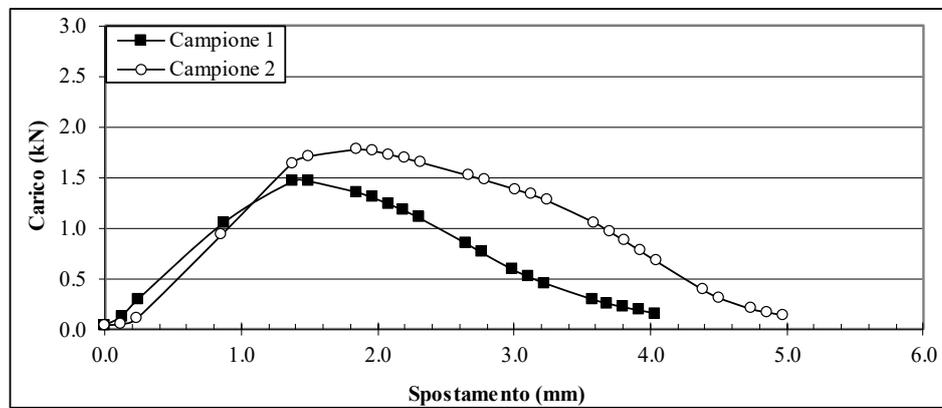
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix2-S-16

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 2
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₁₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 55.9 | 1.47 | 1.377 | 0.112 | 17.1 | A |
| 2 | 57.7 | 1.78 | 1.847 | 0.131 | 16.1 | A |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



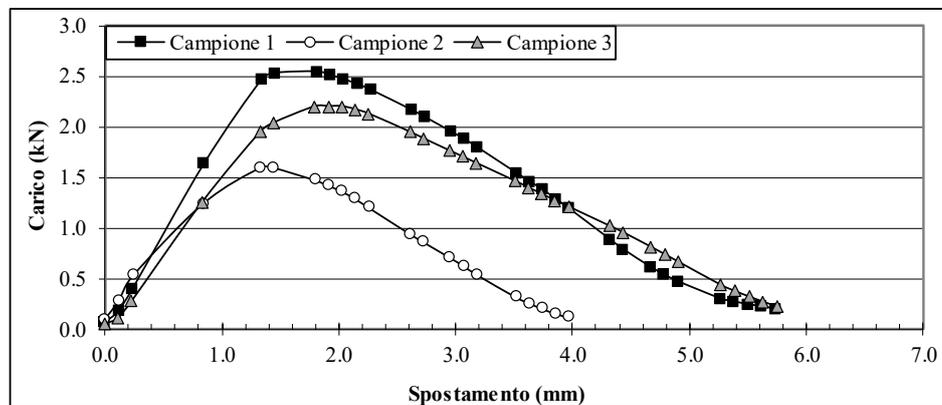
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix3-S-16

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

| | | |
|-----------------------|-------|----------------------------------|
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| NUMERO PROVINI | (-) | 3 |
| TIPO PROVINO | (-) | Confezionato secondo EN 12697-31 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |



| Campione | h | P | s | RTI | v ₁₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 53.3 | 2.54 | 1.812 | 0.202 | 15.1 | A |
| 2 | 55.1 | 1.60 | 1.329 | 0.123 | 16.4 | A |
| 3 | 54.0 | 2.20 | 1.909 | 0.173 | 16.0 | A |

LEGENDA

| | |
|----------------------|---|
| h (mm) | Altezza campione |
| P (kN) | Carico verticale di picco |
| s (mm) | Spostamento in corrispondenza del carico di picco |
| RTI (MPa) | Resistenza a trazione indiretta |
| v ₁₀₀ (%) | Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni |
| Rottura | A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione) |

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



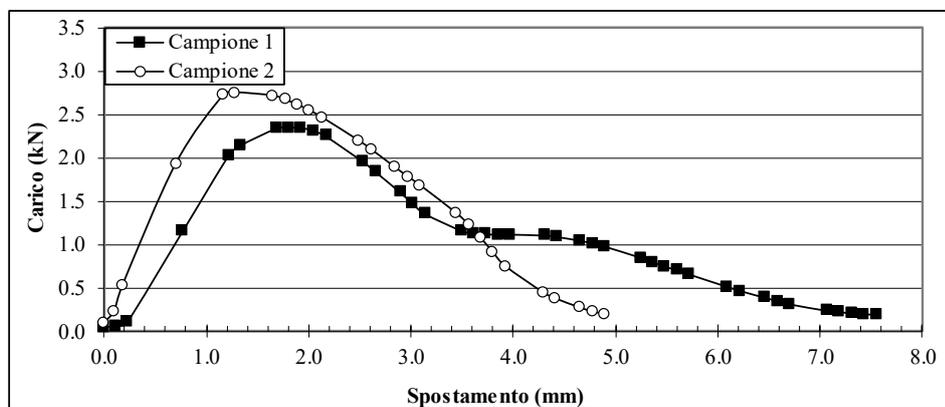
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per
pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix4-S-10.5

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

| | | |
|-----------------------|------|----------------------------------|
| DIAMETRO | (mm) | 150 |
| NUMERO PROVINI | (-) | 2 |
| TIPO PROVINO | (-) | Confezionato secondo EN 12697-31 |
| TEMPERATURA | (°C) | 20 |



| Campione | h | P | s | RTI | v ₁₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 52.9 | 2.35 | 1.808 | 0.189 | 15.4 | A |
| 2 | 52.9 | 2.75 | 1.284 | 0.221 | 16.9 | A |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo



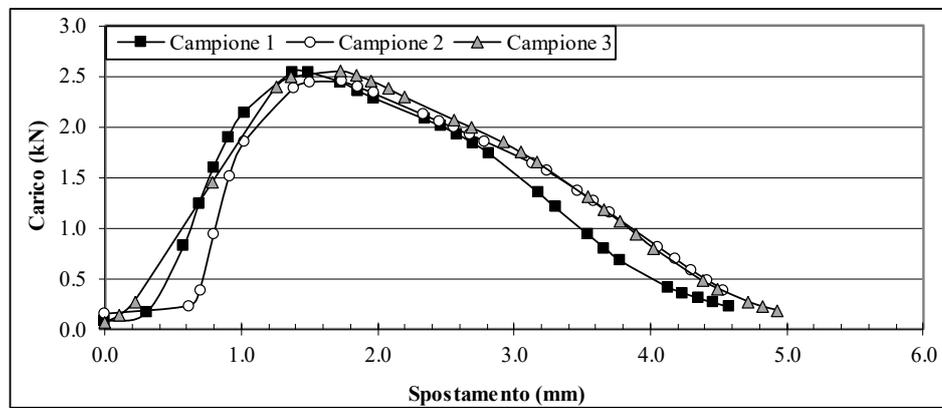
Politecnico di Torino
Laboratorio Materiali Stradali

PROGETTO DI RICERCA: Sviluppo di miscele innovative ad elevato contenuto di materiali riciclati per pavimentazioni stradali

FASE Sperimentazione
MATERIALI Mix4-S-13.5

PARAMETRI DI PROVA - EN 12697-23

DIAMETRO (mm) 150
NUMERO PROVINI (-) 3
TIPO PROVINO (-) Confezionato secondo EN 12697-31
TEMPERATURA (°C) 20



| Campione | h | P | s | RTI | v ₁₀₀ | Rottura |
|----------|------|------|-------|-------|------------------|---------|
| (-) | (mm) | (kN) | (mm) | (MPa) | (%) | (-) |
| 1 | 50.5 | 2.54 | 1.373 | 0.213 | 14.8 | A |
| 2 | 53.3 | 2.45 | 1.735 | 0.195 | 15.7 | A |
| 3 | 54.0 | 2.55 | 1.722 | 0.201 | 16.2 | A |

LEGENDA

h (mm) Altezza campione
P (kN) Carico verticale di picco
s (mm) Spostamento in corrispondenza del carico di picco
RTI (MPa) Resistenza a trazione indiretta
v₁₀₀ (%) Contenuto di vuoti dopo 100 rotazioni
Rottura A (chiara rottura per trazione); B (deformazione); C (combinazione)

Il Tecnico
Ing. Antonio Stirparo