Università Politecnica delle Marche

Facoltà di ingegneria

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

Studio di laboratorio di miscele drenanti modificate in impianto con compound

Laboratory investigation on open-graded asphalt mixtures modified with compounds

Relatore:
Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di laurea di:
Sara Carlucci

A.A 2019/2020

Indice

1 Introduzione **3**

2 Modifica dei leganti e delle miscele bituminose **7**

2.1 Generalità 7

2.2 Tappeto d'usura 9

2.3 Processo di confezionamento di miscele bituminose 12

2.4 Modifica delle miscele bituminose 13

2.4.1 Metodo wet (Polymer Modified Bitumen - PmB) . . . 14

2.4.2 Metodo dry (Polymer Modified Asphalt - PmA) 15

3 Indagine sperimentale **17**

3.1 Introduzione 17

3.2 Materiali impiegati 19

3.2.1 Aggregati lapidei 20

3.2.2 Bitume 24

3.2.3 Fibre 26

3.2.4 Compound polimerico al grafene 27

3.3 Confezionamento miscele 29

3.4 Preparazione e compattazione dei provini 33

3.4.1 Compattazione con pressa giratoria 34

3.4.2 Compattazione con metodo Marshall 37

3.5 Caratteristiche dei provini 38

3.6 Condizionamento provini 44

3.6.1 Condizionamento wet 45

3.6.2 Condizionamento dry 46
3.7 Prove 46
3.7.1 Prova Cantabro 46
3.7.2 Prova di trazione indiretta 49

4 Risultati **55**
4.1 Introduzione 55
4.2 Prova Cantabro 55
4.3 Prova di trazione indiretta 67

5 Conclusioni **77**

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, l'utilizzo del tappeto d'usura drenate su strade interessate da un elevato flusso veicolare, come le autostrade, è diventato di estrema importanza ai fini della sicurezza stradale. Insieme ad altri sistemi necessari ad aumentare la sicurezza, l'introduzione di un tappeto drenante ha contribuito a registrare un abbattimento del tasso di mortalità dell'80% dal 1999 al 2016. Questo ha portato ad avere una percentuale di copertura della rete autostradale con asfalto drenante, dove possibile, pari al 100 %.

L'oggetto di studio della seguente tesi si pone come obiettivo principale quello di mettere a confronto le prestazioni meccaniche di due tipi miscele drenanti, modificate secondo due metodi differenti: la prima è una miscela di riferimento, comunemente impiegata in ambito autostradale e confezionata con bitume modificato con polimeri SBS; in questo caso la modifica è chiamata wet e consiste nel confezionare una miscela con un legante la cui reologia è modificata con specifici polimeri (a seconda del prodotto finale che si vuole ricavare), il che sta a significare che all'atto di produzione del bitume stesso, questo subisce un apposito processo di modifica. La seconda è una miscela confezionata con del bitume tradizionale e, in aggiunta, un materiale innovativo come il compound polimerico al grafene. Nel caso in questione la modifica è detta dry, ovvero è la miscela stessa a subire una modifica durante

la fase produttiva in impianto, proprio grazie all'introduzione del compound stesso. Quest'ultimo richiede che venga seguito un apposito protocollo di utilizzo e che venga impiegato un giusto dosaggio, affinché si abbia un buon prodotto finale.

Lo studio del secondo tipo di miscela implica un ulteriore obiettivo che è quello di ricavare, partendo da un dosaggio base, il dosaggio ottimale di compound che permetta al conglomerato bituminoso di avere delle ottime prestazioni meccaniche. Per questo motivo le miscele confezionate e infine testate sono quattro, dove la prima è la miscela di riferimento, necessaria al confronto e le ultime tre sono miscele modificate a diversi contenuti di compound, oscillando intorno al dosaggio di riferimento che è pari al 7 %. Di seguito verranno esposte in maniera precisa le percentuali di compound impiegate.

L'utilizzo dei tradizionali compound polimerici necessari alla modifica dei conglomerati bituminosi, al fine di aumentare la vita utile delle pavimentazioni stradali, è diventato frequente negli ultimi 15 anni e questo ha portato a una continua ricerca con lo scopo di migliorare le caratteristiche prestazionali dei compound, inserendo ulteriori materiali come, in questo caso, il grafene. Così facendo si è prestata una certa attenzione alla modifica dry dei conglomerati bituminosi; con il continuo sviluppo nella modifica dei conglomerati bituminosi, si è arrivati ad un prodotto che, oltre ad essere funzionale, risulta essere anche ecosostenibile, in quanto permette il recupero parziale di materiali che non possono essere riciclati e anche una riduzione dei consumi energetici.

Il problema principale è quello di verificare che le miscele bituminose confezionate con il compound, siano in grado di rispettare le caratteristiche prestazionali richieste dai Capitolati. A tale proposito, sono state svolte diverse prove di laboratorio (su un numero specifico di provini per ogni miscela,

previsto dalla normativa vigente) su tutte e quattro le miscele e, trattandosi di conglomerati bituminosi drenanti, le prove sono state eseguite su provini condizionati (per un periodo di tempo stabilito dalle apposite normative) in due modi differenti, ovvero: condizionamento umido, inserendo i provini in acqua e condizionamento asciutto, mantenendo i provini ad una temperatura costante di 25°C. Questo è necessario perché, trattandosi di una miscela ad alto tenore di vuoti, risulta essere più sensibile agli agenti atmosferici. Bisogna dunque valutare se l'azione dell'acqua tende a penalizzare, in termini meccanici, i provini in esame.

La tesi si articola in cinque capitoli complessivi:

Nel capitolo corrente è stato presentato, in maniera approssimativa, quello che è l'oggetto di studio dell'elaborato stesso e quelli che sono gli obiettivi e le problematiche che si pone questa sperimentazione.

Nel secondo capitolo viene introdotto l'argomento delle pavimentazioni stradali, focalizzandosi sulle funzionalità di un tappeto d'usura drenante. Si presta, inoltre, una certa attenzione alla modifica dei leganti esponendo in maniera dettagliata le differenze tra le due tipologie di modifica inizialmente accennati.

Il terzo capitolo si suddivide in due parti: la prima riguarda la descrizione dei materiali impiegati, quindi del mix design utilizzato e, in particolar modo, del compound polimerico. La seconda, invece, riguarda la descrizione dei macchinari utilizzati e i processi di confezionamento, compattazione e di prova delle varie miscele.

Nel quarto capitolo vengono esposti i risultati ricavati dall'analisi di laboratorio, presentando e commentando i grafici in base alla tipologia di prova effettuata.

Nel quinto e ultimo capitolo viene fatto un riepilogo dell'oggetto di studio, elencando i principali risultati ottenuti dalla sperimentazione.

Capitolo 2

Modifica dei leganti e delle miscele bituminose

2.1 Generalità

La pavimentazione stradale è la parte superiore del corpo stradale, detta sovrastruttura, ed è formata da diversi strati costituiti da aggregati lapidei, aventi le giuste caratteristiche, legati con legante bituminoso. Ogni strato è determinato da materiali e spessori differenti, questo perché più ci si avvicina alla superficie più lo strato è a stretto contatto con i veicoli e, di conseguenza, si richiedono prestazioni maggiori.

Le funzioni principali sono quelle di:

- Trasmettere e distribuire i carichi superficiali al sottofondo
- Proteggere il sottofondo dalle azioni meteorologiche
- Garantire sicurezza e comfort di marcia

I motivi per i quali la pavimentazione è costituita in diversi strati sono molteplici e in particolar modo: le prestazioni dei materiali impiegati sono funzione della distanza tra lo strato e il carico veicolare (più lo strato è distante, più le prestazioni richieste sono minori). Questo comporta

un'ottimizzazione del materiale, utilizzando del materiale pregiato dove necessario, così da limitare anche i costi. Inoltre gli strati superficiali non sono perfettamente piani, ma seguono determinate pendenze che possono essere determinate costruendo il manto stradale per strati.

In maniera del tutto generale, una pavimentazione stradale flessibile è composta, partendo dall'alto verso il basso, da (fig. 2.1):

- Strato di usura: è lo strato superficiale a contatto con i veicoli, per questo deve essere tale da garantire una certa sicurezza e comfort di marcia, in termini di aderenza e regolarità del piano stradale.

- Binder: è uno strato di collegamento tra tappeto d'usura e base, necessario alla rettifica dei difetti del piano di posa.

- Base: è il cuore della sovrastruttura ed esegue una funzione strutturale, in quanto è necessario a ripartire i carichi indotti dai veicoli.

- Fondazione: con la sua posizione al di sopra del sottofondo (parte inferiore del corpo stradale), consente la trasmissione dei carichi a quest'ultimo.

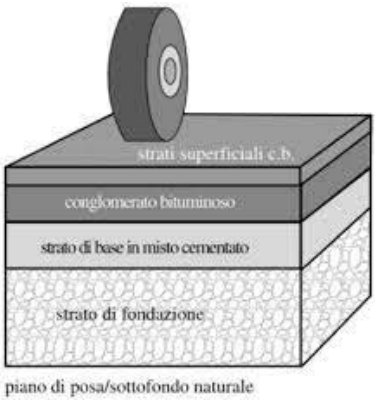

Figura 2.1: Strati pavimentazione

2.2 Tappeto d'usura

Essendo lo strato maggiormente esposto ai carichi stradali, il tappeto d'usura deve essere tale da resistere, grazie all'uso di materiali pregiati (come basalto o porfido), alle azioni leviganti indotte dai veicoli. In questo modo si garantisce nel tempo un'ottima aderenza tra pavimentazione e pneumatico, funzione della microtessitura [1] e della macrotessitura [2] (fig.2.2) che, insieme ad altre caratteristiche (ad esempio le scanalature dello pneumatico) permettono di avere un'ottima aderenza su strada. La particolare forma delle scanalature presenti sul battistrada dello pneumatico, combinata con il tipo di micro e macrotessitura, consente lo smaltimento dell'eventuale velo idrico presente sull'area d'impronta del battistrada; durante il contatto tra pneumatico e pavimentazione, l'acqua presente entra nelle scanalature e si genera una pressione che permette la fuoriuscita dell'acqua stessa nella parte posteriore dello pneumatico.

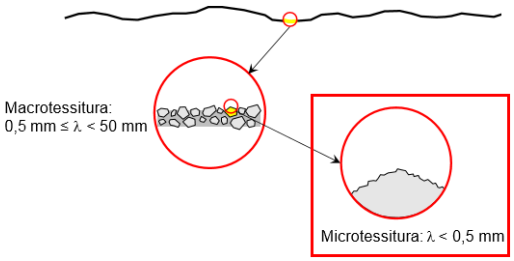

Figura 2.2: Microtessitura e macrotessitura

Quando questo velo idrico ha uno spessore elevato, l'acqua in eccesso non viene smaltita e l'aderenza viene meno.[3]

[1] Dipende dalle caratteristiche superficiali dell'aggregato impiegato.

[2] Dipende dalle caratteristiche di forma e distribuzione granulometrica degli aggregati.

[3] Ci sono ulteriori variabili che incidono sull'aderenza, come la velocità di percorrenza. La microtessitura sviluppa una certa aderenza a velocità inferiori ai 50 km/h, grazie a fenomeni di tipo attritivi. La macrotessitura entra in gioco a velocità maggiori.

Pertanto, in caso di pioggia si manifestano fenomeni causati da una mancata aderenza che sono i seguenti:

- Aquaplaning, il veicolo perde il completo contatto con la superficie stradale e slitta, così da perdere il controllo (fig. 2.3);

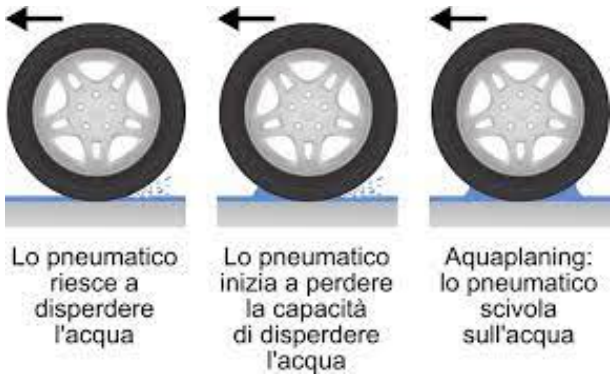

Figura 2.3: Fenomeno dell'aquaplaning

- Effetto spray, si genera quando il velo idrico è spesso e, con il passaggio degli pneumatici, le scanalature del battistrada non sono in grado di smaltire l'acqua in eccesso. In questo modo l'acqua veiene nebulizzata grazie alle sovrappressioni, così da formare un insieme di gocce che rendono scarsa la visibilità ai veicoli che seguono (fig. 2.4).

Figura 2.4: Fenomeno effetto spray

Per questo motivo, dove possibile, è richiesto che lo strato d'usura sia drenante. Questa conformazione del manto stradale permette una certa riduzione dei fenomeni appena descritti.

La caratteristica principale di una miscela drenante, comunemente chiamata miscela aperta, è quella di avere un'elevata percentuale di vuoti. In specifico è stato testato che, affinché la miscela svolga la corretta funzione drenante, la percentuale dei vuoti deve essere almeno del 15 %. Una simile percentuale garantisce la giusta connessione tra i pori presenti nella miscela, così da consentire all'acqua di permeare allontanandosi dalla superficie. Con un manto stradale aperto, il velo idrico non ha le giuste condizioni per formarsi e inoltre, durante il passaggio dei veicoli, le ruote imprimono una certa pressione sull'acqua presente, convogliandola lungo le cavità .

Se la percentuale di vuoti ricade nel range 10-15 %, l'interconnessione tra i pori non è assicurata. Questo comporta che, sempre con il passaggio dei veicoli, le sovrappressioni indotte sull'acqua presente nelle cavità potrebbero essere tali da sgretolare la pavimentazione (proprio perché l'acqua non ha modo di permeare). In via del tutto generale, un buon drenate è costituito dal 20 % di vuoti (i Capitolati per autostrade richiedono una percentuale simile).

Il conglomerato bituminoso drenante è caratterizzato da uno specifico assortimento granulometrico[4], determinato da un'elevata quantità di frazione grossa (limitando le frazioni di fino[5]) e il bitume impiegato deve essere modificato; l'elevato tenore di vuoti riduce i punti di contatto tra i granuli, che sono un punto debole in quanto rappresentano le zone di concentrazione degli sforzi. Per questo motivo, il legante deve essere tale da garantire una buona adesione e, quindi, un'elevata resistenza.

Essendo particolarmente delicata, la miscela drenante presenta diversi svantaggi da non sottovalutare. In particolar modo risulta essere vulnerabile poiché, essendo aperta, è maggiormente esposta agli agenti atmosferici e quindi è sottoposta al rischio di subire facilmente degli sgranamenti, portando

[4]In base alla caratteristica che si vuole ottenere, drenante o fonoassorbente, la curva granulometria deve rispettare degli specifici fusi granulometrici definiti dai Capitolati.

[5]Le frazioni granulometriche più piccole, hanno lo scopo di riempire i vuoti che si formano tra i granuli di grandi dimensioni.

così al disfacimento del manto stradale (non può essere impiegata in qualsiasi zona). Inoltre, grazie alla presenza di pori interconnessi, questi nel tempo tendono a intasarsi a causa dei detriti portando ad una perdita di funzionalità dell'azione drenante.

2.3 Processo di confezionamento di miscele bituminose

Dopo aver determinato un corretto mix design[6], il conglomerato bituminoso viene opportunamente prodotto in appositi impianti, che possono essere continui o discontinui. Le frazioni di materiale lapideo vengono poste in apposite vasche che permettono di stoccare il materiale in modo controllato, essendo dotate di celle di carico. Attraverso un nastro trasportatore il materiale necessario viene trasferito nel cilindro essiccatore, dove gli aggregati vengono riscaldati ad una certa temperatura. In seguito, con un elevatore a tazze si porta il materiale lapideo nella torre di miscelazione (se l'impianto è di tipo discontinuo) dove, gli aggregati caldi ulteriormente vagliati, vengono inseriti nel miscelatore e successivamente mescolati con un quantitativo noto di bitume e di eventuali additivi e, infine, di filler.

Il bitume utilizzato può essere o meno modificato, oppure è possibile effettuare una modifica della miscela all'interno dell'impianto stesso inserendo ulteriori agenti modificanti.

Nella sperimentazione in esame sono state realizzate delle miscele seguendo dei protocolli da laboratorio, così da ricostruire al meglio le fasi vere e proprie che avvengono negli impianti di produzione.

[6]Si tratta del progetto della miscela, stabilendo la curva granulometrica degli aggregati e il quantitativo di bitume.

2.4 Modifica delle miscele bituminose

In determinati casi, miscele bituminose confezionate con un legante tradizionale, potrebbero non avere adeguate caratteristiche chimico/fisiche. Questo è dovuto prima di tutto dal fatto che, con il passare degli anni, le raffinazioni sono sempre più centrate al recupero di diverse sostanze, portando ad un impoverimento del bitume e delle relative prestazioni. Allo stesso tempo, c'è un continuo aumento del volume di traffico, che richiede particolari prestazioni dei materiali impiegati[1].

Pertanto, spesso si sceglie di migliorare la resa del conglomerato seguendo dei metodi di modifica specifici; in base alla scelta dell'agente modificante è possibile ottenere dei miglioramenti mirati a seconda delle esigenze, andando così a garantire una certa qualità, durata e uno specifico rendimento del manto stradale.

In particolar modo, l'utilizzo di una miscela bituminosa modificata permette di:

- Aumentare la resistenza al carico di traffico e alla fatica;
- Aumentare la resistenza alla deformabilità;
- Aumentare, di conseguenza, la vita utile del manto stradale;

I metodi di modifica dei conglomerati bituminosi si differenziano in base al processo di modifica, che porta anche ad una variazione del protocollo di confezionamento delle miscele stesse. In particolar modo uno di questi metodi agisce sul bitume che, migliorando determinate caratteristiche, implica un perfezionamento del conglomerato bituminoso finale. L'altro metodo, invece, opera direttamente sulla miscela, andando ad inserire un ulteriore materiale che ha la funzione di agente modificante.

I metodi di modifica accennati sono comunemente conosciuti come: metodo wet e metodo dry.

2.4.1 Metodo wet (Polymer Modified Bitumen - PmB)

Il metodo wet prevede di attuare una specifica alterazione del bitume attraverso un processo controllato, realizzando un legante ad alte prestazioni[1]. Il processo prevede la modifica della reologia del legante bituminoso, con l'utilizzo di agenti modificanti come, generalmente, polimeri. La modifica in questione è di tipo chimico e ha una certa durata di tempo, durante il quale appunto avvengono specifiche reazioni chimiche tra bitume e polimero. Al termine della trasformazione, si ottiene un legante finale che acquisisce determinate caratteristiche del polimero impiegato e successivamente viene utilizzato per confezionare le miscele bituminose.

I polimeri[7] sono molteplici, ma in ambito stradale quelli comunemente utilizzati sono i polimeri termoplastici. Questi si suddividono in: plastomerici, tra i quali il più utilizzato è l'EVA (etilene-acetato di vinile) ed elastomerici, tra i quali invece il più utilizzato è l'SBS (stirene-butadiene- stirene).

Il miglioramento indotto, dipende da più fattori come:

- Natura del polimero;
- Compatibilità con il bitume;
- Concentrazione del polimero;

In particolar modo la concentrazione è fondamentale e permette di avere una modifica Hard, se la quantità di polimero è del 5/6% oppure Soft, se la quantità di polimero si aggira intorno al 3%.

Tuttavia bisogna considerare diversi aspetti che possono essere poco vantaggiosi, sia dal punto di vista produttivo che dal punto di vista ecosostenibile. In particolare, per produrre una miscela modificata con la tecnica PmB, gli impianti utilizzati sono due: uno è l'impianto di produzione del

[7]Sono lunghe catene molecolari (macromolecole) di diverso tipo, con la caratteristica di essere molto elastiche.

bitume, dove avviene la modifica chimica del legante con i polimeri (attraverso appositi processi), l'altro è l'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, dove avviene il confezionamento della miscela stessa. Inoltre, durante il trasporto da un impianto all'altro del legante modificato, vengono utilizzati degli appositi camion dotati di miscelatore che lavora ad alte temperature, aumentando così le emissioni; la continua miscelazione ad elevate temperature è necessaria sia in fase di trasporto che in fase di stoccaggio, così che, oltre a rendere lavorabile il bitume, si evita anche la separazione tra bitume e polimeri.

2.4.2 Metodo dry (Polymer Modified Asphalt - PmA)

Per quanto riguarda il metodo dry, invece, l'incremento prestazionale è ottenuto tramite un agente modificante, che viene opportunamente inserito durante la fase produttiva della miscela bituminosa[1]. Il bitume impiegato è quello tradizionale e, durante il ciclo produttivo in impianto del conglomerato, si immette il polimero modificante (compound polimerico) appena dopo gli aggregati e prima del legante. Il tutto viene poi miscelato nell'apposita torre di miscelazione, dove avviene la modifica del conglomerato bituminoso.

In questo caso rispetto al metodo wet (PmB), oltre a non esserci il rischio di problemi come la separazione tra bitume e polimeri, si ha un risparmio sia in termini di tempi di produzione, che in termini economici. In particolare è necessario un solo impianto, che è quello di produzione del conglomerato bituminoso, dove è possibile modificare la miscela con l'aggiunta di agenti modificanti (come i compound) e il materiale impiegato ha dei costi accessibili. Inoltre, l'impianto di produzione aumenta la propria efficienza in quanto non necessita di alternare produzioni con bitume tradizionale e bitume modificato.

Ci sono diversi fattori che differenziano le due modifiche, in particolare il tempo del processo di modifica incide in maniera sostanziale. Nel primo

caso (PmB) è il legante che subisce un lungo trattamento prima di essere impiegato, permettendo una trasformazione a livello chimico. Nel secondo caso (PmA), invece, ad essere modificata è la miscela stessa e in tempi molto più brevi rispetto al metodo precedente (questo non consente di agire sulla parte chimica del legante).

Proprio grazie a queste differenze, nella sperimentazione in esame si è voluto mettere a confronto quelli che sono i risultati meccanici ricavati da miscele sottoposte ad entrambi i metodi di modifica. Nel capitolo seguente viene esposto il programma sperimentale e vengono spiegate in dettaglio le differenze che caratterizzano il protocollo di confezionamento delle miscele, a seconda del metodo utilizzato.

Capitolo 3

Indagine sperimentale

3.1 Introduzione

Nella presente sperimentazione, si vogliono mettere a confronto quelle che sono le prestazioni meccaniche di miscele bituminose drenanti, confezionate e modificate attraverso i due metodi differenti (esposti in dettaglio nel capitolo precedente).

Il programma sperimentale prevede le seguenti fasi:

- Realizzazione di 4 miscele bituminose, seguendo un apposito mix design;
- Produzione di provini tramite compattazione con pressa giratoria (sia per provini Cantabro che ITS) e compattazione con metodo Marshall (per soli provini Cantabro);
- Condizionamento dry e wet dei provini, per un certo periodo di tempo;
- Esecuzione di due prove meccaniche per ogni miscela, che sono prova di trazione indiretta e prova Cantabro;

Nel dettaglio, le miscele confezionate sono: una di riferimento OGR, comunemente impiegata in ambito autostradale, prodotta con bitume modificato SBS e tre miscele OGC1, OGC2 e OGC3, realizzate con del bitume

tradizionale, e modificate con tre percentuali diverse di compound polimerico al grafene, rispettivamente del 5%, 7% e 9%[1] (tab.3.1).

Miscela	Modifica	Bitume	Compound	Provini	Temp. di miscelazione
OGR	metodo wet	SBS	/	18	170 °C
OGC1	metodo dry	50/70	5%	18	180 °C
OGC2			7%	18	
OGC3			9%	18	

Tabella 3.1: Nomenclatura delle miscele realizzate

Seguendo le direttive predisposte dalle normative di riferimento[2], è stato stabilito il numero e le dimensioni dei provini rappresentanti lo strato d'usura e in specifico: sono stati realizzati di base 18 provini per ogni miscela, dove 8 sono stati impiegati per la prova ITS e 10 per la prova Cantabro (tab. 3.2). Di questi, per ogni prova, metà sono stati condizionati in bagno termostatico a 40°C (condizionamento wet) e l'altra metà in camera climatica a 25°C (condizionamento dry). Si specifica che, per quanto riguarda i provini Catabro, è stato aggiunto un totale di 20 provini condizionati esclusivamente dry (tab. 3.3) e compattati con metodo Marshall.

Per quanto riguarda le dimensioni, tutti i provini sono stati preparati con un diametro standard di 100 mm. Mentre l'altezza dei provini stessi, che è stata determinata con la compattazione, si aggira intorno ai 63,5 mm con un range di accettazione di +/- 2,5 mm, così come richiesto per la prova Cantabro (i provini con un'altezza al di fuori del range indicato, non sono idonei per essere sottoposti alla prova Cantabro).

[1]Le percentuali impiegate di compound sono riferite al peso di bitume totale.

[2]Per la prova ITS si fa riferimento alle normativa UNI EN 12697-23, mentre per la prova Cantabro alla UNI EN 12697-17.

Miscela	Temp. di compattazione	Condizion.	Provini PL	Provini IT	D
/	[°C]	/	/	/	[mm]
OGR	160	wet/dry	10	8	100
OGC1	170	wet/dry	10	8	100
OGC2	170	wet/dry	10	8	100
OGC3	170	wet/dry	10	8	100

Tabella 3.2: Provini compattati con pressa giratoria

Miscela	Temp. di compattazione	Condizion.	Provini PL	D
/	[°C]	/	/	[mm]
OGR	160	dry	4	100
OGC1	170	dry	5	100
OGC2	170	dry	5	100
OGC3	170	dry	6	100

Tabella 3.3: Provini compattati con metodo Marshall

Per poterli distinguere, i provini sono stati etichettati con uno specifico codice: le prime tre lettere stanno ad indicare di quale miscela si tratta (se di riferimento o se modificata con compound); il numero successivo (per le sole miscele modificate con compound), indica il quantitativo in percentuale di compound utilizzato per la modifica, in ordine crescente; le due lettere seguenti stanno ad indicare il tipo di prova e, in specifico, è stata adottata la sigla PL (particle loss) per la prova Cantabro effettuata su provini compattati con pressa giratoria, IT per la prova di trazione indiretta e M, sempre per provini Cantabro, ma compattati con metodo Marshall.

3.2 Materiali impiegati

Per la realizzazione delle quattro miscele bituminose, sono stati messi a disposizione i seguenti materiali:

- 125 kg di aggregati di varia pezzatura, in particolar modo basalto e una quantità di RAP (fresato)
- 2 kg di bitume modificato SBS hard
- 5 kg di bitume 50/70 (non modificato)
- fibre
- Compound polimerico al grafene

3.2.1 Aggregati lapidei

Gli aggregati lapidei rappresentano la struttura solida di una miscela bituminosa e vengono impiegati, con diverse percentuali, in varie pezzature; solitamente lo scopo è quello di creare uno scheletro solido ben assortito, così da migliorare le caratteristiche meccaniche. Come già accennato, per uno strato drenante si limita la frazione di aggregati piccoli, in modo da avere un'elevata percentuale di vuoti.

In particolar modo, le pezzature si possono distinguere in:

- Aggregato grosso: inerti trattenuti al vaglio con apertura di 2 mm, rappresentano la struttura portante e da essi dipende la lavorabilità e la stabilità della miscela [3]
- Aggregato fine: Inerti trattenuti al vaglio con apertura tra 2 mm e 0,063 mm, rappresentano la frazione di aggregati necessari a riempire i vuoti tra i granuli di dimensioni maggiori
- Filler: frazione passante allo 0,063 mm, rappresenta la parte fina degli aggregati lapidei che, insieme al bitume, forma un mastice con la

[3] Se il diametro maggiore è troppo piccolo, il materiale rischia di disperdersi nella miscela e viene meno l'attrito tra i granuli, portando ad una miscela instabile. Se, invece, è troppo grande si compromette la lavorabilità della miscela, pertanto deve essere rispettata la relazione $D<S/3$, dove S è lo spessore dello strato

principale funzione di dare consistenza al legante, garantendo un buon ricoprimento dell'aggregato[4]

Componendo le varie frazioni in diverse percentuali, si ottiene la curva granulometrica che sta a rappresentare l'assortimento dello scheletro solido. Da questa dipendono le caratteristiche funzionali e meccaniche della miscela realizzata.

Per ottenere una buona curva granulometrica, ci sono delle tolleranze da rispettare e, essendo difficile avvicinarsi ad una sola specifica curva granulometrica di riferimento, la tolleranza è rappresentata da un fuso granulometrico composto da due curve, che stanno a rappresentare un limite superiore e un limite inferiore. Pertanto, la curva deve essere contenuta all'interno del fuso di riferimento. Da quest'ultimo dipendono, in particolare, le specifiche funzioni che deve avere la miscela da realizzare.

Gli inerti utilizzati per la realizzazione della curva sono aggregati vergini di primo impiego, ma è possibile sostituire una frazione granulometrica con i giusti aggregati di riciclo (RAP)[5]. La percentuale di utilizzo e l'origine del RAP, dipendono dallo strato di impiego; ci sono dei limiti nell'utilizzo del fresato, in quanto gli aggregati sono rivestiti da una certa quantità di bitume del quale, una piccola percentuale, viene riattivata nella nuova miscela. Siccome il bitume riattivato è un legante ossidato (invecchiato), è bene che questa percentuale sia limitata, soprattutto negli strati più importanti come il tappeto d'usura; a seconda dello strato dove vengono impiegati, gli aggregati devono avere diversi requisiti. In particolar modo, per uno stato d'usura vengono impiegati materiali pregiati come basalto o porfido, avendo una superficie ruvida ed essendo maggiormente resistenti alle azioni tangen-

[4]Il bitume ricopre la superficie degli aggregati, ma con una pellicola sottile, in quanto questo tende a scolare. La presenza del filler permette la formazione di una pellicola spessa di legante sull'aggregato.

[5]La frazione di aggregati di riciclo, viene comunemente chiamata fresato e rappresenta il materiale legato ricavato dalla demolizione di vecchie pavimentazioni. Questo poi viene suddiviso in base allo strato di provenienza.

ziali indotte dai veicoli.

In seguito nella tabella 3.4 vengono mostrate le percentuali dei passanti degli aggregati che costituiscono la curva granulometrica (con il relativo fuso di riferimento), impiegata per la realizzazione delle miscele per lo strato d'usura (la curva in figura 3.1 è la stessa per ogni miscela):

Dim. setacci [mm]	Passante [%]	Pass. Fuso [%]	Pass. Fuso [%]
31,5	100	100	100
20	100	100	100
14	92,1	85	94
10	49,5	38	53
6,3	23,4	13	26
2	14,2	8	18
0,5	8,4	6	12
0,25	6,9	6	10
0,063	4,5	4	8

Tabella 3.4: Curva granulometrica

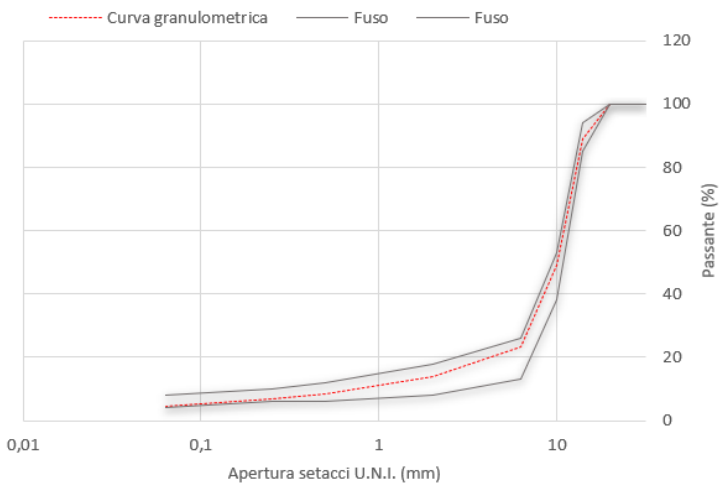

Figura 3.1: Curva granulometrica e relativo fuso di riferimento

Il materiale lapideo utilizzato è: basalto, presente in frazione 0-2 e 4-8 come mostrato in figura 3.2 e in frazione 10-16 (a sinistra in figura 3.3), RAP 8-16 (a destra in figura 3.3) e dal filler calcareo (fig.3.4).

Figura 3.2: Basalto 0-2 e basalto 4-8

Figura 3.3: basalto 10-16, RAP 8-16

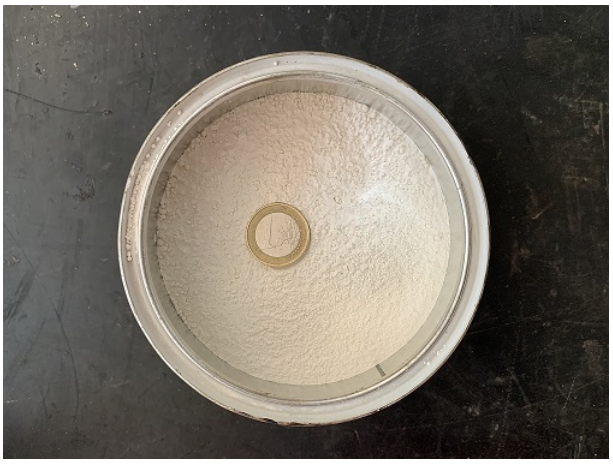

Figura 3.4: Filler calcareo

3.2.2 Bitume

Il bitume è un legante prodotto nelle raffinerie e deriva dai residui della distillazione del petrolio, con la caratteristica di essere un materiale impermeabile all'acqua e termoplastico[6]; necessita di elevate temperature per poter essere lavorato.

Le proprietà chimico-fisiche del legante, dipendono dal tipo di petrolio distillato e si determinano sottoponendo il bitume a diverse prove. In specifico, il valore di penetrazione a 25°C è necessario per suddividere il bitume in diverse classi[7]; in base alla zona di impiego, viene scelta una specifica classe di bitume, tenendo conto dell'intervallo di utilizzo Frass-Palla anello che indica rispettivamente: la temperatura di rottura del bitume (rappresenta la fragilità del bitume a bassa temperatura) e il punto di rammollimento.

Nella presente sperimentazione sono stati impiegati due tipi di leganti:

- Il bitume 50/70, impiegato per confezionare le miscele OGC1, OGC2 e OGC3 modificate con metodo dry attraverso diverse dosi di compound

[6]Cambia consistenza al variare della temperatura.

[7]Ogni classe è determinata da due numeri, che stanno ad indicare i limiti dei valori di penetrazione.

polimerico al grafene.

Il 50/70 è comunemente adoperato in quanto risulta essere abbastanza lavorabile, ma ha un intervallo di utilizzo molto ristretto e, in specifico, pari a: -8°C/50°C; in periodi caldi, con l'azione dei carichi, la pavimentazione è facilmente soggetta a deformazioni permanenti mentre, in periodi particolarmente freddi, a causa dell'elevata rigidezza si creano delle fessure.

- Il bitume SBS hard modificato, invece, secondo il metodo wet e impiegato per realizzare la miscela di riferimento OGR. Il legante in questione è stato modificato con polimero elastomerico a base di gomma termoplastica Stirene-Butadiene-Stirene, seguendo un determinato processo di modifica agente sulla reologia[8] del legante stesso. Il processo di modifica è di tipo chimico e ha una durata di circa 7 ore, durante le quali avvengono delle vere e proprie reazioni, che permettono alle molecole del polimero utilizzato di legarsi alle molecole di bitume subendo, dunque, un rigonfiamento (si utilizza un massimo del 6% di polimero). A modifica ultimata, il legante adotta la maggior parte delle caratteristiche fisiche del polimero utilizzato, in base alla percentuale impiegata.

La modifica di tipo hard consente di utilizzare una percentuale di elastomero del 5/6%, così da avere un ritorno elastico del 75%[9] e un ampliamento dell'intervallo di utilizzo (Frass-Palla anello).

Le modifiche portano a svariati vantaggi, in particolar modo si ha [2]: una maggiore resistenza all'invecchiamento [10], una maggiore stabilità termica della pavimentazione stradale e la deformabilità è minore (essendoci un ritorno elastico), riducendo le ormaie.

[8]La reologia definisce il comportamento tenso-deformativo del materiale, in funzione della temperatura. Il bitume presenta un comportamento visco-elastico e una forte dipendenza dalla temperatura.

[9]Un bitume tradizionale non presenta alcun ritorno elastico.

[10]L'invecchiamento è l'ossidazione del bitume. Questo porta, dunque, ad un indurimento del bitume e di conseguenza ad un infragilimento.

Il quantitativo di bitume imposto per tutte le miscele è indicato nella seguente tabella (tab. 3.5):

Bitume tot. rif. al Mix	Bitume tot. rif. inerti	Bitume vergine rif. inerti
4,90%	5,15%	4,55%

Tabella 3.5: Quantità di bitume

Essendoci una frazione di fresato, è presente una minima quantità di bitume riattivato di 0,6.%

3.2.3 Fibre

Le fibre (fig. 3.5) sono costituite da filamenti che possono essere di diversa natura e hanno molteplici funzioni, in particolare: trattengono il bitume in eccesso evitando che questo scoli, ma contribuiscono ad aumentare anche le prestazioni meccaniche della miscela, migliorandone la stabilità, la resistenza a trazione indiretta e la resistenza a fatica.

Figura 3.5: Fibre

3.2.4 Compound polimerico al grafene

I compound polimerici sono composti formati da diversi materiali e vengono impiegati come agenti di modifica per la produzione di conglomerati bituminosi modificati. Nel caso in questione, prestando una particolare attenzione alla tecnica PmA (metodo dry), i particolari polimeri impiegati per la realizzazione del compound vengono opportunamente modificati con l'aggiunta del grafene[1]. Quest'ultimo permette un notevole miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei polimeri e, quindi, della miscela stessa.

Con la particolare struttura stratificata (fig. 3.6), la grafite è formata da atomi di carbonio legati tra loro con legami covalenti, disposti in diversi piani a loro volta legati tramite interazioni di van der Waals. Il particolare composto utilizzato per migliorare i polimeri, si ricava a partire dalla grafite stessa e, tramite un processo innovativo, si creano delle nanoparticelle di grafene sotto forma di polvere o sferette, che rendono il prodotto altamente prestazionale e privo di solventi o sostanze chimiche.

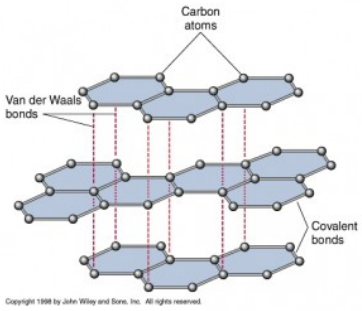

Figura 3.6: Struttura grafite

Il compound polimerico al grafene si presenta sotto forma di granuli (fig.3.7) con diametro compreso tra 1,0-4,0 mm e di colore grigio/nero, grazie alla presenza di atomi di carbonio. La particolare caratteristica, è che il composto viene realizzato tramite un processo innovativo ad alta efficienza e sostenibilità. Inoltre, esso risulta essere costituito in parte da plastiche di recupero selezionate, ovvero le così dette plastiche dure destinate allo

smaltimento con termovalorizzatori; non tutte le plastiche dure posso essere utilizzate, pertanto vengono trattate tramite un processo di tecno-selezione[11] per poi essere impiegate nuovamente, senza essere smaltite. Infine, le restanti parti che costituiscono il materiale sono: una base funzionale coperta da segreto professionale e le nanoparticelle di grafene.

Figura 3.7: Compound polimerico al grafene

L'utilizzo del composto in esame permette di avere importanti vantaggi, sia dal punto di vista della riduzione degli impatti ambientali (è eco-sostenibile), che dal punto di vista funzionale. In specifico va sottolineato che:

- Il processo produttivo del compound stesso è a basso consumo energetico, così da limitare le emissioni.

- C'è un recupero sostanziale di materiali destinati ai termovalorizzatori.

- I materiali derivanti dalle demolizioni delle pavimentazioni stradali, contenenti il supermodificante a base di grafene, possono essere riutilizzati.

- La vita utile delle pavimentazione risulta essere maggiore e, inoltre, vengono limitati gli interventi di manutenzione, quindi i costi.

[11] E' un processo che si basa sulla selezione di plastiche dure, in funzione delle caratteristiche chimico-fisiche adatte.

3.3 Confezionamento miscele

I conglomerati bituminosi sono stati prodotti seguendo diversi protocolli da laboratorio, a seconda della modifica eseguita. In seguito verranno descritti i passaggi svolti, mettendo in evidenza quelle che sono le differenze tra una miscela prodotta e modificata con metodo wet e una miscela prodotta e modificata, invece, con metodo dry.

Inoltre, per eseguire il processo di confezionamento delle miscele sono stati utilizzati: il forno (fig. 3.8), necessario a scaldare i materiali per un certo periodo di tempo alla temperatura di miscelazione (la temperatura di miscelazione è diversa a seconda che si tratti della miscela di riferimento o delle miscele con compound, tab.3.2) e il miscelatore (fig. 3.8). Quest'ultimo viene opportunamente programmato, in modo da regolare la velocità delle pale, la temperatura e la durata dei vari step, che sono fattori essenziali per poter miscelare al meglio i materiali elencati.

Figura 3.8: Forno (sinistra) e miscelatore (destra)

Questi due macchinari devono essere adeguatamente preriscaldati, alle determinate temperature di miscelazione, per circa 2 ore prima di essere uti-

lizzati.

La miscela di riferimento OGR è stata realizzata adottando le quantità di materiale indicate nel mix design (uguale per tutte le miscele), riportate in tabella (tab. 3.6):

Sabbia 0-2	Graniglia 4-8	Graniglia 10-16	RAP 8-16	Filler /	Fibre /	Bitume SBS /
11%	16%	56%	15%	2%	0,3%	4,55%
2,75 kg	4 kg	14 kg	3,75 kg	0,5 kg	75 g	1,14 kg

Tabella 3.6: Quantità di materiale

Il materiale lapideo è stato opportunamente preparato prima di effettuare il processo di confezionamento e suddiviso, in base alle frazioni granulometriche, attraverso delle pesate su bilancia. La stessa cosa è stata fatta per le fibre.

Per quanto riguarda il bitume, invece, questo è stato pesato direttamente dopo la fase di riscaldamento e prima di essere immesso nella miscela (per essere versato, il bitume deve essere adeguatamente riscaldato così da diventare abbastanza fluido).

Il protocollo per la realizzazione della miscela in esame, si suddivide in due fasi fondamentali: come prima cosa c'è la fase di riscaldamento, che consiste nel riscaldare i materiali noti (fibre escluse) per una certa quantità di tempo. In particolare gli aggregati lapidei e il filler vengono riscaldati per 3 ore, il bitume SBS hard per circa 2 ore[12] e, infine, il RAP per dieci minu-

[12]Il bitume necessita di essere riscaldato prima di miscelare, così che diventi fluido e facile da lavorare. La presenza dei polimeri fa si che il legante venga scaldato per più tempo, perché tendono a formarsi dei grumi.

ti prima della miscelazione[13]. Si passa poi alla seconda fase che è appunto quella di miscelazione, che prevede l'introduzione dei diversi materiali nel miscelatore in vari step, a seconda della programmazione della macchina in questione (miscelatore fig. 3.8). In particolare i materiali vengono inseriti in un determinato ordine e man mano miscelati per una certa durata di tempo. Prima di tutto vengono immessi gli aggregati e le fibre, per poi miscelare per 30 s. In seguito viene pesato e inserito il bitume SBS e miscelato per 60 s e ,infine, si procede inserendo il filler, in modo che venga a distribuirsi in maniera omogenea e si miscela poi per un tempo di 5 minuti.

Per quanto riguarda le miscele modificate con compound, indicate con i codici OGC1, OGC2, OGC3 (tab. 3.1), sono state anch'esse realizzate con le stesse quantità di materiale (tab.3.7) riportate nel mix design:

Sabbia	Graniglia	Graniglia	RAP	Filler	Fibre	Bitume 50/70
0-2	4-8	10-16	8-16	/	/	/
11 %	16 %	56 %	15 %	2 %	0,3 %	4,55 %
2,75 kg	4 kg	14 kg	3,75 kg	0,5 kg	75 g	1,14 kg

Tabella 3.7: Quantità materiale

A differenza della miscela di riferimento, è stato ulteriormente inserito il compound in diverse percentuali, rispetto alla quantità di bitume totale riferita agli inerti (1,29 kg), riportate in tabella 3.8:

[13]Il legante che riveste gli aggregati, rappresenta una quota di bitume che potrebbe essere riattivato nella miscela. Per limitare l'ulteriore invecchiamento del bitume stesso, è bene che il fresato venga inserito in forno per un tempo breve.

Miscela	Compound [%]	Compound [g]
OGC1	5	64
OGC2	7	90
OGC3	9	116

Tabella 3.8: Percentuali di compound polimerico al grafene

Per preparare le miscele modificate con compound, va seguito un determinato protocollo da laboratorio. Le differenze, rispetto alla miscela di riferimento, riguardano: le temperature di miscelazione e compattazione (tab. 3.1) e la fase di miscelazione prevede uno step aggiuntivo di una specifica durata.

Inoltre, va specificato che il compound stesso non deve essere riscaldato prima della fase di miscelazione, ma va opportunamente inserito nel miscelatore a freddo.

A parità di tutte le operazioni descritte per la miscela di riferimento, in questo caso il protocollo di confezionamento delle miscele si differenzia in base alle tempistiche dei vari step e alla temperatura durante la realizzazione della miscela.

In particolare, per quanto riguarda la fase di riscaldamento: sia la temperatura di miscelazione che quella di compattazione sono maggiori (tab.3.1, tab. 3.2 e tab. 3.3) e la durata di riscaldamento del bitume 50/70 è di circa mezzora [14], il tempo necessario a farlo diventare fluido. Mentre, per quanto riguarda la fase di miscelazione, dopo aver miscelato i soli aggregati e fibre per 30 s, bisogna attendere che il miscelatore stabilizzi nuovamente la temperatura. Una volta che la temperatura si trova in un range di 160-180 °C, è possibile procedere con lo step aggiuntivo che riguarda l'inserimento del compound nella miscela. Inserito adeguatamente il materiale, si mantiene la miscela a 180°C (temperatura di miscelazione) per 30 minuti. Dopodiché si

[14] Rispetto al bitume SBS, l'assenza di polimeri permette al legante di diventare fluido in meno tempo.

procede con i soliti step, inserendo allo stesso modo il bitume 50/70 con una miscelazione di 60 s e, infine, il filler miscelando per 5 min.

A miscelazione ultimata, si suddivide il conglomerato ottenuto in più porzioni di quantità nota, come indicato in tabella 3.9:

D	h	V	$\gamma Teor.$	m
[mm]	[mm]	[mm^3]	[g/cm^3]	[g]
100	63,5	498728	2	997,5

Tabella 3.9: Massa provini

La massa si ricava determinando il volume, in base al diametro e all'altezza noti e moltiplicandolo per la massa volumica teorica:

$$m = \frac{V \cdot \gamma}{1000} \tag{3.1}$$

Man mano che si suddivide il conglomerato bituminoso, si inseriscono le vaschette in forno alla temperatura di compattazione indicata nelle tabelle 3.2 e 3.3 (in base al tipo di miscela); è bene effettuare questa procedura nel minor tempo possibile, così da non far raffreddare la miscela prodotta.

Le vaschette vengono opportunamente numerate, in modo da far passare almeno 2 ore dall'inserimento in forno della prima vaschetta prima di iniziare a compattare.

3.4 Preparazione e compattazione dei provini

Dopo aver scaldato per due ore le miscele frazionate, alle relative temperature di compattazione, si procede con la preparazione dei provini partendo dalla prima vaschetta inserita in forno e così via. E' importante riscaldare anche le fustelle necessarie per la compattazione così che il materiale, durante

l'addensamento, mantenga la giusta temperatura indicata.

Nella sperimentazione in esame sono stati adottati due metodi di compattazione, utilizzando di base una compattazione con pressa giratoria sul numero indicato di provini (tab. 3.2) e, in aggiunta, sono stati compattati in media 4 provini per ogni miscela con metodo Marshall (tab. 3.3). Questo è stato fatto per poter mettere a confronto i valori di Particle Loss ricavati dalla prova Cantabro perché, per quanto riguarda questa prova, la normativa prevede che sia possibile realizzare i provini con entrambi i metodi di compattazione, ma che i risultati dalla prova potrebbero leggermente variare a seconda che si adotti uno o l'altro metodo.

A seconda del tipo di compattazione sono state utilizzate diverse fustelle, ma in entrambi i casi con diametro da 100 mm [15].

In questa fase è importante procedere nel minor tempo possibile, così da garantire la compattazione alla giusta temperatura (le fustelle impiegate non devono raffreddarsi). Quest'ultima influenza notevolmente il procedimento di addensamento.

3.4.1 Compattazione con pressa giratoria

La pressa giratoria (fig. 3.9) è un macchinario comunemente utilizzato per compattare i provini. Questa è costituita da un telaio di carico dove, nella parte superiore è presente il pistone[16] che imprime al materiale presente nella fustella, una pressione costante di 600 kPa. Nella parte inferiore è presente una base rotante, che permette di compiere un tot di giri al minuto, e un supporto inclinabile che permette, invece, di inclinare la fustella di un certo angolo chiamato angolo giratorio. Quest'ultimo ha un valore mini-

[15] Per normativa i provini Cantabro sono espressamente richiesti con diametro da 100 mm.

[16] La testa del pistone di carico che viene a contatto con la fustella è intercambiabile, a seconda del diametro che può essere di 100 mm o di 150 mm

mo di 1,25° e consente la generazione di sollecitazioni tangenziali necessarie all'addensamento del provino.

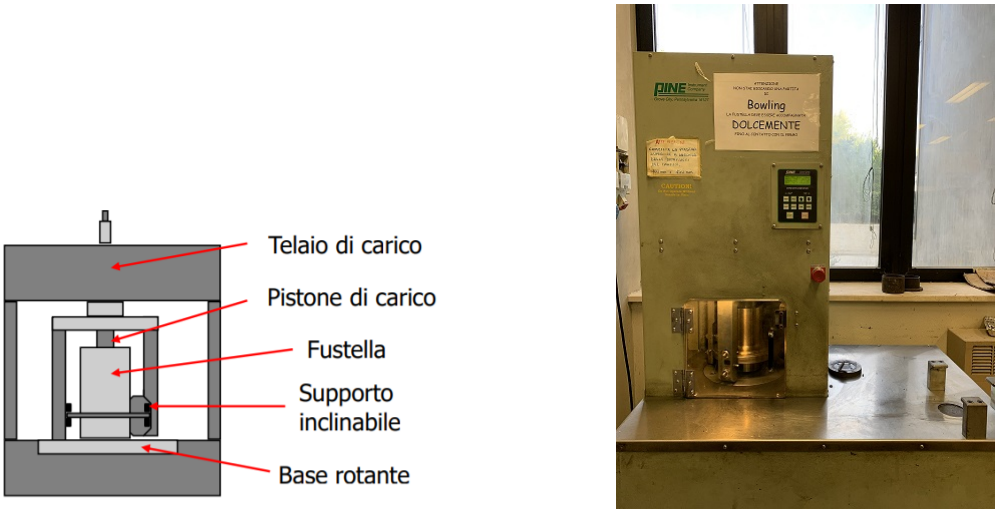

Figura 3.9: Schema pressa giratoria (sinistra) e macchinario pressa giratoria (destra)

Al di sopra della base rotante, viene adagiata la fustella metallica contenete il materiale bituminoso. La fustella in questione è costituita da: un tappo metallico inferiore, che consente di contenere il materiale all'interno e una piastra metallica superiore, che consente di poter imprimere una pressione omogenea sul materiale attraverso il pistone di carico.

La configurazione del macchinario descritto, consente di simulare al meglio la compattazione che avviene in sito con i rulli. Questo avviene grazie all'azione combinata di sollecitazioni normali (indotte dal pistone) e tangenziali (indotte grazie alla combinazione della rotazione e dell'inclinazione dell'asse del provino), come mostrato in figura 3.10.

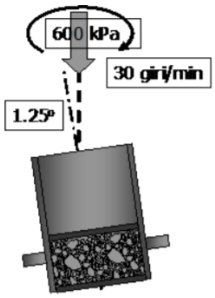

Figura 3.10: Sollecitazioni indotte al provino

E' possibile impostare la pressa giratoria in due modi:

1. Ad altezza imposta, quindi preparando un provino di geometria nota;
2. A giri imposti, applicando una certa energia (che simula le azioni in sito) così da ricavare le dimensioni del provino;

Per la sperimentazione in oggetto è stata usata la pressa giratoria a giri imposti, compattando i provini a diversi giri a seconda delle prove da eseguire successivamente. In particolar modo, la serie di provini destinati alla prova Cantabro è stata compattata a 40 giri, ricavando così un conglomerato bituminoso con un grado di addensamento più basso. Mentre, la serie di provini sottoposti alla prova ITS, è stata compattata a 130 giri ottenendo una miscela più chiusa. Il numero di giri è dettato dalle normative di riferimento delle prove.

La realizzazione dei provini avviene, come accennato, al termine delle due ore in forno delle miscele divise nelle varie vaschette e si procede man mano per ogni provino: si isola la superficie inferiore della fustella con un disco di carta, per poi inserire il quantitativo di conglomerato presente nelle singole vaschette; si procede livellando la superficie superiore con apposita spatola, per poi isolarla, sempre con un disco di carta, dalla piastra metallica che viene inserita per chiudere la fustella. Dopodiché si conclude adagiando la fustella nell'apposita macchina (pressa giratoria), dove verrà compattato il

materiale. A fine compattazione è possibile estrudere il provino con un apposito martinetto idraulico.

3.4.2 Compattazione con metodo Marshall

A parità di quanto visto per la pressa giratoria, in questo caso a variare è la fase di compattazione che avviene con metodo Marshall. La differenza sta nel principio su cui si basa il metodo di compattazione, totalmente differente dalla pressa giratoria.

La pressa Marshall agisce sul conglomerato con una massa battente, imprimendo un certo numero di colpi (dettati dalla normativa) sulle facce del provino. Nel caso il esame la normativa EN 12697-30[3] prescrive un numero di colpi, per lato, pari a 50. Inoltre, le fustelle cilindriche utilizzate sono dotate di una prolunga che evita la fuoriuscita del materiale durante la prova.

In seguito viene mostrato uno schema del macchinario impiegato per la compattazione con metodo Marshall (fig. 3.11):

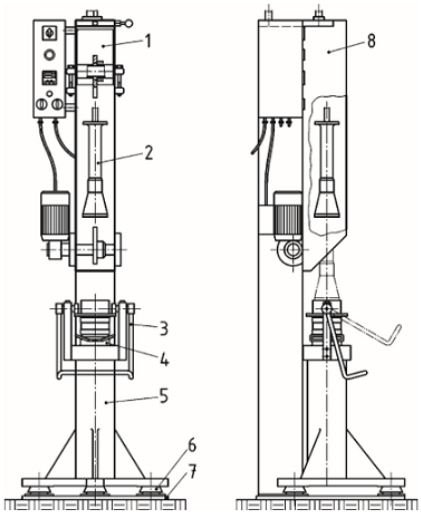

Figura 3.11: Pressa Marshall

Proprio grazie al differente principio di compattazione, i provini compattati con metodo Marshall risultano avere un grado di addensamento maggiore rispetto ai provini compattati con pressa giratoria a 40 giri e, quindi, sono determinati da una percentuale di vuoti inferiore.

E' bene precisare che, i provini Cantabro sono stati compattati il giorno stesso del confezionamento dalla miscela mentre, i provini ITS, sono stati compattati nel giorno seguente; il giorno di compattazione è fondamentale in quanto i provini realizzati vanno poi condizionati per un certo periodo di tempo imposto sempre da normativa.

E' stato seguito questo criterio per tutte le miscele.

3.5 Caratteristiche dei provini

Dopo aver realizzato i provini, è stata stimata la percentuale di vuoti attraverso il metodo geometrico (si tratta di un metodo approssimativo). Questo consiste nel ricavare le misure di ogni provino[17], necessarie a determinare il volume con la seguente formula geometrica:

$$V = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot 1000 \tag{3.2}$$

ricavando poi la massa attraverso una pesata su bilancia, è possibile calcolare il peso specifico dei vari provini:

$$\gamma = \frac{m}{V} \tag{3.3}$$

e, infine, essendo noto il γ max teorico pari a 2 g/cm^3, è possibile applicare la seguente formula per poter calcolare la percentuale dei vuoti:

$$\%Vuoti = 100 \cdot \frac{(\gamma max - \gamma)}{\gamma max} \tag{3.4}$$

[17]E' stata misurata l'altezza in 4 punti, così ricavarne un dato medio; mentre il diametro è stato considerato pari a 100 mm.

Di seguito vengono riportate tutte le misure prese e le percentuali dei vuoti calcolate per ogni provino di ogni miscela, suddivisi in: provini Cantabro compattati con pressa giratoria, provini Cantabro compattati con metodo Marshall e provini ITS (nomenclatura provini §3.1).

- Miscela di riferimento OGR:

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGR_PL1	985,60	100	66,50	522,29	1,887	2,418	24
W	OGR_PL3	989,10	100	65,60	515,42	1,919	2,418	23
W	OGR_PL5	1000,30	100	67,80	532,11	1,880	2,418	24
W	OGR_PL6	999,60	100	67,30	528,18	1,893	2,418	24
W	OGR_PL7	998,30	100	67,50	530,14	1,883	2,418	24
D	OGR_PL8	995,10	100	66,80	524,25	1,898	2,418	23
D	OGR_PL9	999,30	100	67,40	529,16	1,888	2,418	24
D	OGR_PL10	994,50	100	67,80	532,11	1,869	2,418	25
D	OGR_PL11	969,20	100	66,40	521,31	1,859	2,418	25
D	OGR_PL12	952,90	100	65,30	512,47	1,859	2,418	25

Tabella 3.10: Dati provini PL della miscela OGR

Cond.	Provino	Peso	D	h m	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
D	OGR_M1	968,00	100	61,30	481,65	2,009	2,481	19
D	OGR_M2	970,80	100	60,50	475,17	2,043	2,481	18
D	OGR_M3	978,60	100	60,42	474,58	2,062	2,481	17
D	OGR_M4	975,40	100	58,58	460,05	2,120	2,481	15

Tabella 3.11: Dati provini Marshall della miscela OGR

Cond.	Provino	Peso	D	h m	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGR_IT1	995,60	100	64,30	504,62	1,973	2,418	20
W	OGR_IT2	1002,20	100	64,40	505,60	1,982	2,418	20
W	OGR_IT3	990,90	100	64,30	504,62	1,964	2,418	21
W	OGR_IT4	1000,8	100	65,10	511,49	1,957	2,418	21
D	OGR_IT5	1002,9	100	65,10	511,49	1,961	2,418	21
D	OGR_IT6	990,0	100	65	510,51	1,939	2,418	22
D	OGR_IT7	996,90	100	65,40	513,45	1,942	2,418	22
D	OGR_IT8	1001,10	100	65,10	511,49	1,957	2,418	22

Tabella 3.12: Dati provini ITS della miscela OGR

- Miscela OGC1 (modificata con il 5% di compound):

Cond.	Provino	Peso	D	h m	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGC1_PL1	945,80	100	64,90	509,94	1,858	2,418	25
W	OGC1_PL3	944,80	100	63,80	499,51	1,891	2,418	24
W	OGC1_PL5	951,9	100	63,00	494,80	1,924	2,418	22
W	OGC1_PL6	947,10	100	63,80	502,65	1,884	2,418	24
W	OGC1_PL7	950,50	100	64,00	501,08	1,897	2,418	24
D	OGC1_PL8	946,20	100	63,90	501,80	1,888	2,418	24
D	OGC1_PL9	946,60	100	64,90	508,94	1,860	2,418	25
D	OGC1_PL10	949,90	100	63,90	501,08	1,896	2,418	24
D	OGC1_PL11	951,40	100	63,90	502,65	1,893	2,418	24
D	OGC1_PL12	945,10	100	64,30	502,65	1,880	2,418	24

Tabella 3.13: Dati provini PL della miscela OGC1

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
D	OGC1_M1	1009,00	100	60,75	477,13	2,114	2,481	14
D	OGC1_M2	1045,60	100	63,00	494,80	2,113	2,481	14
D	OGC1_M3	1038,60	100	62,00	490,09	2,119	2,481	14
D	OGC1_M4	1031,30	100	61,30	483,81	2,131	2,481	14
D	OGC1_M5	1033,50	100	64,00	501,87	2,059	2,481	16

Tabella 3.14: Dati provini Marshall della miscela OGC1

Cond.	Provino	Peso	D	h m	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGC1_IT1	952,70	100	61,00	479,00	1,989	2,418	20
W	OGC1_IT2	953,80	100	60,30	471,24	2,024	2,418	18
W	OGC1_IT3	955,10	100	60,80	479,00	1,994	2,418	20
W	OGC1_IT4	952,30	100	61,10	479,09	1,988	2,418	20
D	OGC1_IT5	954,30	100	60,50	475,17	2,009	2,418	19
D	OGC1_IT6	951,50	100	62,00	486,95	1,954	2,418	21
D	OGC1_IT7	950,30	100	60,80	477,52	1,990	2,418	20
D	OGC1_IT8	948,80	100	60,90	477,52	1,987	2,418	20

Tabella 3.15: Dati provini IT della miscela OGC1

-Miscela OGC2 (modificata con il 7% di compound):

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGC2_PL1	946,20	100	63,00	494,80	1,912	2,418	23
W	OGC2_PL3	955,90	100	64,00	502,65	1,902	2,418	23
W	OGC2_PL5	955,20	100	63,30	496,76	1,923	2,418	22
W	OGC2_PL6	957,00	100	64,10	503,64	1,900	2,418	23
W	OGC2_PL7	953,30	100	64,30	504,81	1,888	2,418	24
D	OGC2_PL8	956,90	100	64,70	508,15	1,883	2,418	24
D	OGC2_PL9	957,30	100	65,00	510,12	1,877	2,418	24
D	OGC2_PL10	956,70	100	64,00	502,65	1,903	2,418	23
D	OGC2_PL11	956,20	100	64,40	505,80	1,890	2,418	24
D	OGC2_PL12	953,40	100	63,50	498,34	1,913	2,418	23

Tabella 3.16: Dati provini PL della miscela OGC2

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
D	OGC2_M1	964,70	100	59,40	466,52	2,067	2,481	16
D	OGC2_M2	950,70	100	59,95	470,84	2,019	2,481	18
D	OGC2_M3	967,90	100	59,40	466,52	2,074	2,481	16
D	OGC2_M4	988,30	100	60,95	478,70	2,064	2,481	16
D	OGC2_M5	1094,30	100	69,50	545,85	2,004	2,481	19

Tabella 3.17: Dati provini Marshall della miscela OGC2

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGC2_IT1	955,80	100	60,90	478,11	1,992	2,418	19
W	OGC2_IT2	959,50	100	61,30	481,65	2,004	2,418	20
W	OGC2_IT3	957,20	100	60,80	477,72	2,003	2,418	19
W	OGC2_IT4	957,50	100	60,90	478,11	2,007	2,418	19
D	OGC2_IT5	959,00	100	60,90	478,11	1,960	2,418	19
D	OGC2_IT6	953,60	100	62,00	486,55	2,008	2,418	21
D	OGC2_IT7	955,20	100	60,60	475,75	1,980	2,418	19
D	OGC2_IT8	954,20	100	61,40	482,23	2,013	2,418	20

Tabella 3.18: Dati provini IT della miscela OGC2

-Miscela OGC3 (modificata con il 9% di compound):

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGC3_PL1	955,10	100	62,80	493,23	1,936	2,418	22
W	OGC3_PL3	955,90	100	62,80	493,43	1,937	2,418	22
W	OGC3_PL5	952,40	100	62,30	488,91	1,948	2,418	21
W	OGC3_PL6	953,70	100	65,00	510,12	1,870	2,418	25
W	OGC3_PL7	952,50	100	63,50	498,34	1,911	2,418	23
D	OGC3_PL8	947,40	100	63,80	501,28	1,890	2,418	24
D	OGC3_PL9	948,70	100	62,40	490,09	1,936	2,418	22
D	OGC3_PL10	953,70	100	64,60	507,37	1,880	2,418	24
D	OGC3_PL11	952,10	100	63,00	494,41	1,926	2,418	22
D	OGC3_PL12	949,00	100	62,90	494,02	1,921	2,418	23

Tabella 3.19: Dati provini PL della miscela OGC3

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
D	OGC3_M1	1069,80	100	65,37	513,45	2,083	2,481	14
D	OGC3_M2	1103,20	100	67,25	528,18	2,088	2,481	14
D	OGC3_M3	1085,60	100	65,30	512,86	2,117	2,481	12
D	OGC3_M4	1077,50	100	65,25	512, 47	2,102	2,481	13
D	OGC3_M5	1100,40	100	65,62	515,41	2,134	2,481	12
D	OGC3_M6	1072,30	100	65,32	513,06	2,090	2,481	14

Tabella 3.20: Dati provini Marshall della miscela OGC3

Cond.	Provino	Peso	D	h m.	V	γ	γmax	Vuoti
/	/	[g]	[mm]	[mm]	[cm^3]	[g/cm^3]	[g/cm^3]	%
W	OGC3_IT1	951,00	100	60,00	471,24	2,018	2,418	19
W	OGC3_IT2	959,80	100	61,80	485,57	1,977	2,418	20
W	OGC3_IT3	955,10	100	61,70	484,20	1,973	2,418	20
W	OGC3_IT4	959,70	100	61,60	483,61	1,984	2,418	20
D	OGC3_IT5	956,50	100	60,00	471,24	2,030	2,418	18
D	OGC3_IT6	957,10	100	60,40	473,99	2,019	2,418	19
D	OGC3_IT7	955,80	100	60,30	473,20	2,020	2,418	19
D	OGC3_IT8	959,40	100	61,20	480,66	1,996	2,418	20

Tabella 3.21: Dati provini IT della miscela OGC3

3.6 Condizionamento provini

Prima di eseguire le prove meccaniche sui provini realizzati, questi sono stati adeguatamente condizionati a distanza di tre giorni dalla compattazione. E' stata presa come riferimento la specifica normativa EN 12697-12[4] e le configurazioni alle quali sono stati sottoposti i provini sono: condizionamento wet e condizionamento dry.

3.6.1 Condizionamento wet

Il condizionamento wet consiste nel condizionare i provini in acqua per un certo periodo di tempo e ad una determinata temperatura. Questi fattori vengono imposti dalla normativa di riferimento e, nel caso in questione, i provini sono stati tenuti in acqua per circa 72 ore ad una temperatura di 40°C.

I provini vengono inseriti nel bagno termostatico (fig. 3.12) con acqua distillata; la quantità di acqua deve essere tale da ricoprire completamente la superficie dei campioni. Una volta inseriti i provini, viene impostata la temperatura dell'acqua e viene accesa istantaneamente la pompa, che è necessaria al ricircolo dell'acqua in modo da rendere la temperatura omogenea.

Figura 3.12: Bagno termostatico

Al termine delle 72 ore, i provini vengono tirati fuori dall'acqua 24 ore prima di effettuare le prove. Questo perché, prima di effettuare i test, l'acqua deve essere completamente assente. In particolar modo è necessario per i provini Cantabro, in quanto il test si basa sulla perdita di peso tra prima e dopo l'esecuzione della prova stessa; prima di eseguire la prova viene effettuata una pesata, così da verificare che il peso del provino non sia variato rispetto al peso registrato prima del condizionamento.

3.6.2 Condizionamento dry

La restante parte dei provini viene condizionata con configurazione dry, che consiste nel metterli in camera climatica ad una temperatura di 25°C (temperatura ambiente).

In questo caso, il tempo necessario a condizionare i provini è di almeno 4 ore. Questo garantisce che i provini arrivino ad una temperatura costante.

Per questioni pratiche, i provini dry sono stati mantenuti in camera climatica anch'essi per 72 ore, per poi essere sottoposti alle diverse prove; trattandosi di una temperatura ambiente, l'importante è rispettare il limite minimo di almeno 4 ore prima delle prove.

3.7 Prove

Con lo scopo di analizzare quello che è comportamento meccanico delle miscele prodotte e, quindi, di mettere a confronto le prestazioni del conglomerato modificato con compound, con quelle comunemente ottenute dal conglomerato di riferimento, sono state eseguite due prove: la prova Cantabro e la prova di trazione indiretta. In questo modo è stato possibile, oltre che verificare l'efficacia del metodo dry, anche individuare il quantitativo adatto di compound da inserire nella miscela.

Per poter eseguire ciascuna prova, sono state prese in considerazione le relative normative di riferimento, che verranno indicate nei prossimi paragrafi.

3.7.1 Prova Cantabro

La prova Cantabro è stata effettuata sia su provini compattati con pressa giratoria a 40 giri (per ogni miscela 5 sono condizionati wet e 5 dry, tab. 3.2), quindi con un grado di addensamento più basso, sia su provini compattati con metodo Marshall (in media 4 provini per ogni miscela, condizionati dry, tab. 3.3). Lo scopo è stato, prima di tutto, quello di mettere a confronto

i vari materiali utilizzati e poi, trattandosi di una miscela drenante, è stato fondamentale mettere in evidenza un'eventuale differenza tra i provini wet e dry, ipotizzando che quelli condizionati con configurazione wet fossero più sensibili alla prova, grazie all'azione dell'acqua subita. Inoltre è stato necessario verificare se ci fossero differenze, in termini di risultati della prova, tra provini compattati con pressa giratoria e provini Marshall.

Facendo riferimento alla normativa EN 12697-17[5], per questo tipo di prova sono richiesti provini con un diametro di 100 mm; per questioni pratiche si è scelto di realizzare tutti i provini (sia Cantabro che ITS) con le stesse dimensioni.

Il test Cantabro viene effettuato con la macchina Los Angeles, che è costituita da un cilindro rotante in acciaio (fig. 3.13) dotato di un'apertura superiore, necessaria a inserire il provino all'interno.

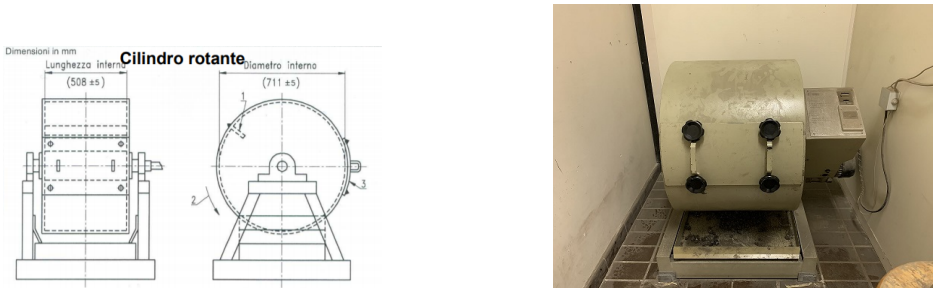

Figura 3.13: Schema macchina Los Angeles (sinistra) e macchina Los Angeles (destra)

Sulla superficie interna del cilindro sono presenti delle sbarre poste sul lato lungo, necessarie e raccogliere il provino durante la rotazione del cilindro, così da permettere che esso arrivi ad una certa altezza e che successivamente urti sulle pareti laterali; solitamente per garantire l'efficacia degli urti, vengono inserite delle sfere di acciaio standardizzate. Nel caso in questione, secondo la normativa [5], per poter effettuare la prova Cantabro le sfere devono essere asportate dal cilindro (queste vengono utilizzate esclusivamente per

la prova Los Angeles), così che il provino urti esclusivamente contro le pareti.

Per poter essere sottoposto alla prova, il provino va mantenuto in camera climatica ad una temperatura di 15-25°C per almeno 4 ore; prima di effettuare il test bisogna pesare il provino [18], registrando così un peso W1 [g] (dovrebbe coincidere con il peso del provino prima del condizionamento). Si procede, dunque, inserendo il provino nella macchina Los Angeles e azionando il cilindro rotante ad una velocità di 3,0-3,5 rad/s, così da compiere circa 33 giri/min, per un totale di 300 giri. Successivamente, a prova ultimata, il provino dovrà essere nuovamente pesato registrando il peso W2 [g][19]; dopo l'esecuzione della prova e prima di pesare il provino, bisogna asportare il materiale instabile presente sulla superficie, attraverso l'utilizzo di un panno.

Infine si calcola l'indice Cantabro, indicato con la sigla PL (particle loss), attraverso la seguente formula:

$$PL = 100 \cdot \frac{(W1 - W2)}{W1} \tag{3.5}$$

In seguito (Fig. 3.14) viene mostrato come si presentano i provini prima e dopo l'esecuzione della prova:

[18]Nel caso di provini dry il peso è totalmente invariato mentre, nel caso di provini wet il peso potrebbe leggermente variare grazie alla presenza di acqua, E' bene che prima della prova l'acqua sia totalmente drenata.

[19]Essendoci perdita di materiale W2 $<$ W1 e la differenza tra i due indica il materiale perso durante il test.

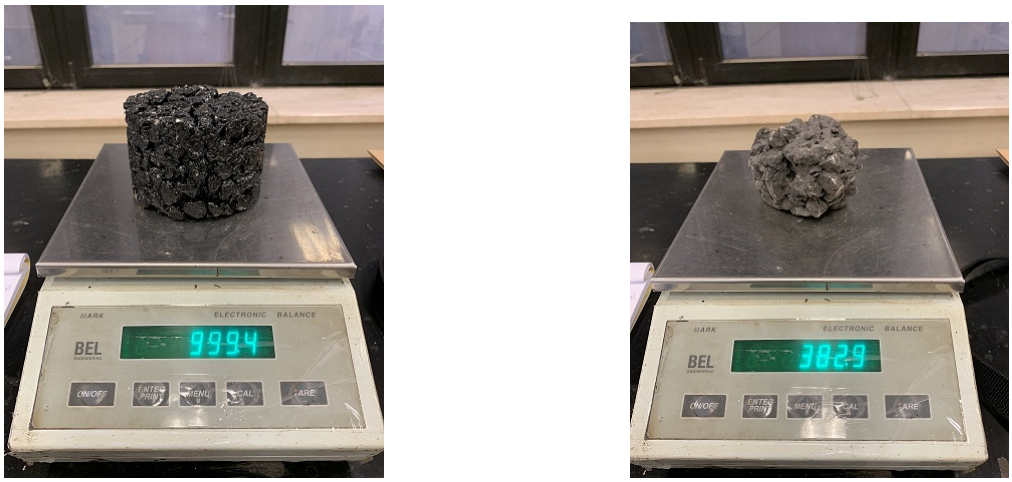

Figura 3.14: Provino prima e dopo l'esecuzione della prova Cantabro

3.7.2 Prova di trazione indiretta

La prova in questione, consente di ricavare la resistenza a trazione attraverso un metodo indiretto; essendo i provini cilindrici e costituiti da un materiale lapideo legato, ci sono difficoltà pratiche per ricavare una resistenza a trazione con metodi diretti (il provino rischierebbe di rompersi ancor prima di iniziare la prova). Pertanto si effettua un test di trazione indiretta (brasiliana) che, tramite una compressione impressa al provino, permette di ricavare la resistenza a trazione, sfruttando l'effetto Poisson.

I provini utilizzati (per ogni miscela 4 condizionati wet e 4 condizionati dry, tab. 3.2) sono stati compattati a 130 giri con pressa giratoria §3.3.2, con un grado di addensamento maggiore (in questo caso i provini sono stati compattati con sola pressa giratoria).

Per questa prova si utilizza una pressa universale. Essa è costituita da un telaio di prova regolabile in altezza, al centro del quale si fissa l'apparecchiatura per prova ITS, a sua volta formata da due piastre metalliche collegate tra loro attraverso dei perni longitudinali, come mostrato in figura 3.15. Le due piastre in questione si avvicinano tra loro comprimendo il provino.

Sulla superficie delle piastre metalliche vengono opportunamente avvitati i listelli (adatti alle dimensioni del provino, in questo caso con diametro 100 mm)[20], tra i quali va posizionato il provino stesso.

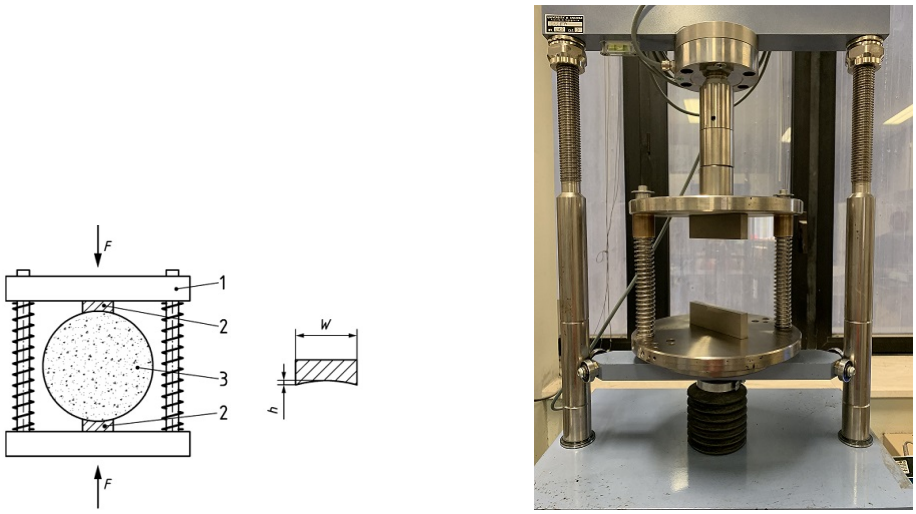

Figura 3.15: Schema apparecchiatura ITS (sinistra) e apparecchiatura ITS (destra)

Nella parte inferiore del telaio è collegata la piastra di caricamento della pressa che si sposta verso l'alto, ad una certa velocità; la piastra di caricamento può spostarsi rispettando determinati limiti, senza andare fuori corsa. Nella parte superiore, invece, si trova il pistone rispetto al quale l'apparecchiatura ITS va in contrasto durante la prova. In questo modo, il provino posto nel mezzo viene sottoposto ad una certa compressione, che lo porta poi a rottura.

Questo tipo di macchinario viene controllato da remoto attraverso un computer dal quale è possibile spostare le piastre, tarare la macchina e azionarla per eseguire la prova. Viene utilizzato un apposito programma UTM II, che è in grado di tracciare il diagramma sforzo-deformazione e di ricavare i

[20] I listelli sono caratterizzati da una superficie curvilinea che si adatta alla conformazione dei provini, così da permetterne la stabilità (fig. 3.15).

dati necessari, come: il carico a rottura per compressione (picco della curva), la deformazione unitaria di compressione e l'indice ITS (resistenza a trazione indiretta). Tutti questi dati vengono archiviati nel database del programma e vengono poi elaborati tramite un ulteriore programma (Access), dove è possibile visualizzare una serie di dati registrati punto per punto durante la prova (serie x= spostamento o corsa, serie y= carico applicato), suddivisi in base al codice della prova (il numero di test effettuato).

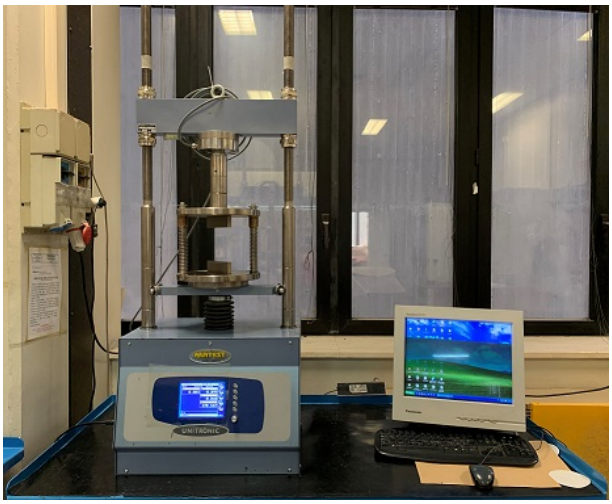

Figura 3.16: Apparecchiatura ITS e pc di controllo

La prova si esegue poggiando il provino in orizzontale sul listello inferiore, avendo l'accortezza di posizionarlo al centro lungo l'asse di carico, così che il carico stesso venga applicato in maniera omogenea sul provino. Si procede poi abbassando delicatamente la piastra superiore (mobile), in modo da bloccare il campione tra i due listelli.

Passando al computer si inseriscono i dati del provino in esame come il codice, la massa e l'altezza. Si prosegue tarando il macchinario e, poi, azionando la prova che viene eseguita ad una velocità di corsa standard di 50,8 mm/min. Il test dura pochi secondi e si suddivide in due fasi: una fase di avvicinamento (il pistone si avvicina alla piastra superiore) e una fase di

prova (il provino viene schiacciato), durante la quale viene tracciata la curva sforzo - deformazione che ha un classico andamento a campana, con un picco che sta a rappresentare il carico a rottura.

A rottura ultimata (fig.3.17), il software calcola automaticamente l'indice ITS di ogni provino. Tuttavia la normativa UNI EN 12697-23 [6] fornisce una formula per calcolare la resistenza a trazione indiretta:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot h} \tag{3.6}$$

Dove:
- P= Carico a rottura
- D= Diametro del provino [mm]
- h= altezza media [mm]

Figura 3.17: Provino sottoposto a rottura

Calcolando i valori medi dell'indice ITS sia wet che dry, è possibile calcolare la suscettività all'acqua dei provini tramite la seguente relazione:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \cdot 100 \tag{3.7}$$

Riportando poi in tabella tutti i dati che calcola automaticamente il software, è possibile calcolare anche il coefficiente di trazione indiretta:

$$CTI = \frac{\pi \cdot ITS \cdot D}{2 \cdot \delta c} \tag{3.8}$$

.

Dove δc è la deformazione verticale.

Infine, così come per l'indice ITS, sono stati calcolati i valori medi anche dell'indice CTI, sia wet che dry.

Capitolo 4

Risultati

4.1 Introduzione

Nel capitolo in questione vengono esposti e commentati gli esiti delle prove effettuate sui provini di ogni miscela realizzata, con lo scopo di confrontare i dati meccanici ottenuti e analizzare il comportamento dei conglomerati modificati con compound, in relazione alla miscela di riferimento. Sono stati adeguatamente suddivisi i risultati della prova Cantabro, da quelli della prova ITS.

4.2 Prova Cantabro

La prova Cantabro è stata eseguita su un totale di 40 provini (10 per ogni miscela, §3.1 tab.3.2) compattati con pressa giratoria e su un totale di 20 provini compattati con metodo Marshall; secondo la normativa [5] i provini da sottoporre a tale prova, possono essere compattati in entrambi i modi, ricavando una certa differenza tra i valori PL.

I due metodi di compattazione indicati differiscono dal grado di addensamento finale conferito al singolo provino (è possibile notare la differenza della percentuale dei vuoti nelle tabelle riportate nel paragrafo §3.4), pro-

prio per questo si è cercato di capire se ci fosse una certa correlazione tra la percentuale di vuoti e l'indice PL ricavato dalla prova.

E' bene specificare che valori alti di PL stanno ad indicare un'elevata differenza tra peso iniziale W1 e peso finale W2 e, quindi, un'importante perdita di materiale durante la prova; generalmente in condizioni dry si ritiene accettabile una perdita di peso inferiore al 20%, in condizioni wet si considera accettabile una perdita di peso minore del 35%.

Si riportano in seguito le tabelle con i valori ricavati di particle loss per ogni miscela, suddivisi in base al metodo di compattazione effettuato e i relativi grafici.

Inoltre, così come indicato nelle tabelle, per la serie di provini compattati con pressa giratoria: i primi 5 sono condizionati wet (W) e la restante parte dry (D). Mentre i provini compattati con metodo Marshall sono stati condizionati esclusivamente dry. Questa suddivisione è visibile anche nei grafici.

- Miscela OGR:

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
W	OGR_PL1	995,30	202,50	79
W	OGR_PL3	996,80	355,5	64
W	OGR_PL5	1008,20	319,40	68
W	OGR_PL6	1008,40	309,70	69
W	OGR_PL7	1009,10	360,90	63
D	OGR_PL8	995,30	493,80	50
D	OGR_PL9	999,40	382,80	61
D	OGR_PL10	994,90	308,90	68
D	OGR_PL11	969,40	120,40	87
D	OGR_PL12	953,10	191,80	79

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
D	OGR_M1	968,60	803,80	17
D	OGR_M2	971,30	739,70	24
D	OGR_M3	979,60	813,10	17
D	OGR_M4	976,60	766,70	21

Tabella 4.1: Valori di Particle Loss

PL wet	Dev. Sta.	PL dry	Dev. Sta.
[%]	[%]	[%]	[%]
69,20	6,30	69,70	14,7

PL medio	Dev. Sta.
[%]	[%]
20	3,40

Tabella 4.2: Valori medi di particle loss e deviazione standard. Provini compattati con pressa giratoria (sinistra) e provini compattati con pressa Marshall (destra)

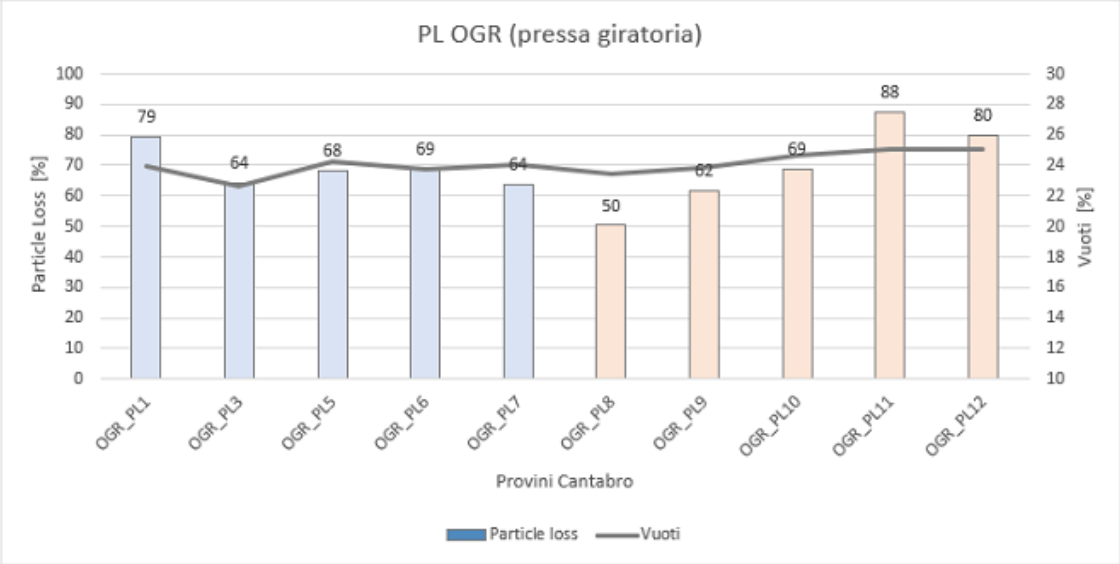

Figura 4.1: Grafico valori PL (provini compattati con pressa giratoria)

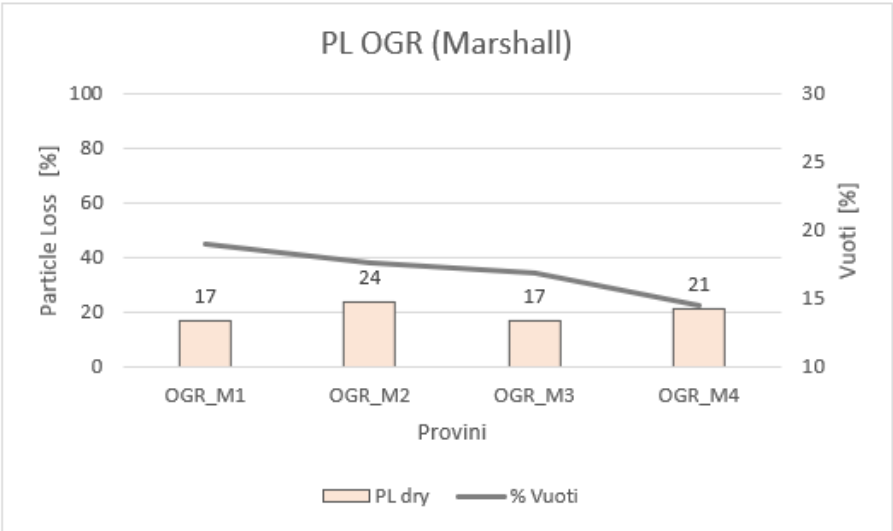

Figura 4.2: Grafico valori PL (provini compattati con pressa Marshall)

- Miscela OGC1:

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
W	OGC1_PL3	958,30	310,70	66
W	OGC1_PL4	957,90	270,60	70
W	OGC1_PL5	964,50	579,50	38
W	OGC1_PL6	959,60	389,10	58
W	OGC1_PL7	962,00	394,80	57
D	OGC1_PL8	947,50	195,70	79
D	OGC1_PL9	947,90	219,10	76
D	OGC1_PL10	950,70	404,70	57
D	OGC1_PL11	952,30	395,00	58
D	OGC1_PL12	945,80	339,80	64

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
D	OGC1_M1	1009,90	798,70	21
D	OGC1_M2	1046,90	835,90	20
D	OGC1_M3	1039,20	821,80	21
D	OGC1_M4	1032,50	819,20	21
D	OGC1_M5	1035,20	808,40	22

Tabella 4.3: Valori di Particle Loss

PL wet	Dev. Sta.	PL dry	Dev. Sta.
[%]	[%]	[%]	[%]
58,20	12,20	67,10	10,30

PL medio	Dev. Sta.
[%]	[%]
21	0,63

Tabella 4.4: Valori medi di particle loss e deviazione standard. Provini compattati con pressa giratoria (sinistra) e provini compattati con pressa Marshall (destra)

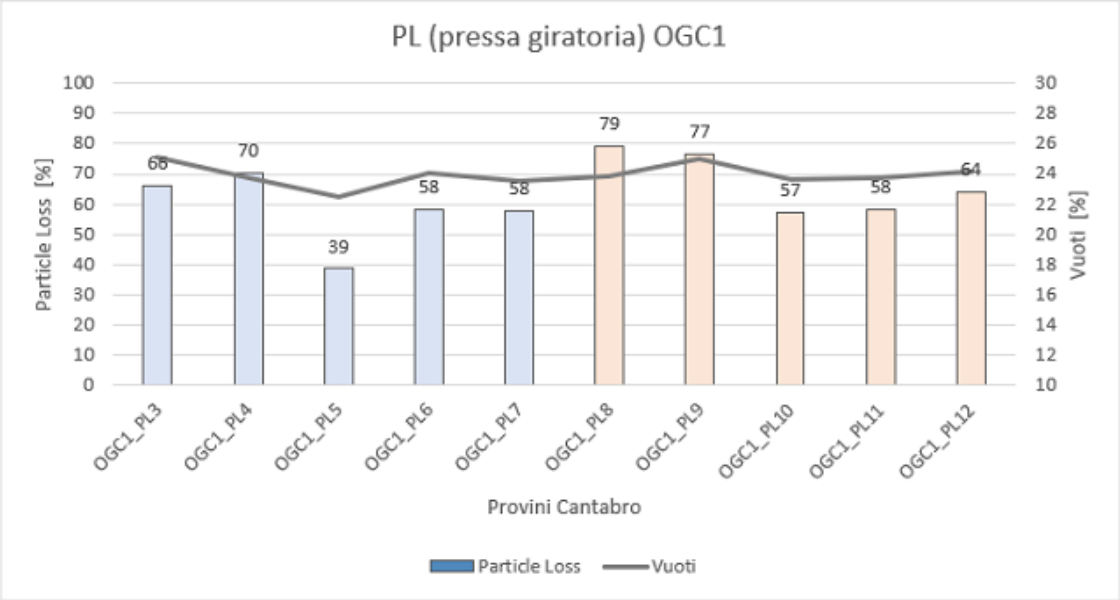

Figura 4.3: Grafico valori PL (provini compattati con pressa giratoria)

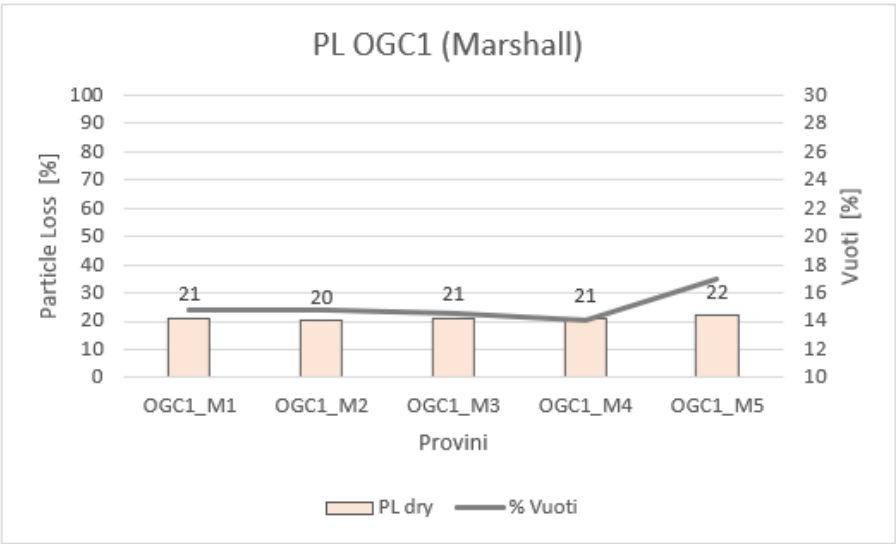

Figura 4.4: Grafico valori PL (provini compattati con pressa Marshall)

- Miscela OGC2:

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
W	OGC2_PL1	955,80	241,40	74
W	OGC2_PL2	964,10	266,30	72
W	OGC2_PL3	966,80	290,30	69
W	OGC2_PL4	967,50	485,80	49
W	OGC2_PL5	962,00	440,40	53
D	OGC2_PL6	956,50	358,40	62
D	OGC2_PL7	956,60	319,70	66
D	OGC2_PL8	956,30	254,00	73
D	OGC2_PL9	955,40	382,40	60
D	OGC2_PL10	952,80	482,20	49

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
D	OGC2_M1	965,60	518,00	46
D	OGC2_M2	951,80	322,00	66
D	OGC2_M3	968,90	706,90	27
D	OGC2_M4	988,70	581,80	41
D	OGC2_M5	1094,30	360,10	67

Tabella 4.5: Valori di Particle Loss

PL wet	Dev. Sta.	PL dry	Dev. Sta.
[%]	[%]	[%]	[%]
64,20	11,40	62,40	8,9

PL medio	Dev. Sta.
[%]	[%]
50	17,11

Tabella 4.6: Valori medi di particle loss e deviazione standard. Provini compattati con pressa giratoria (sinistra) e provini compattati con pressa Marshall (destra)

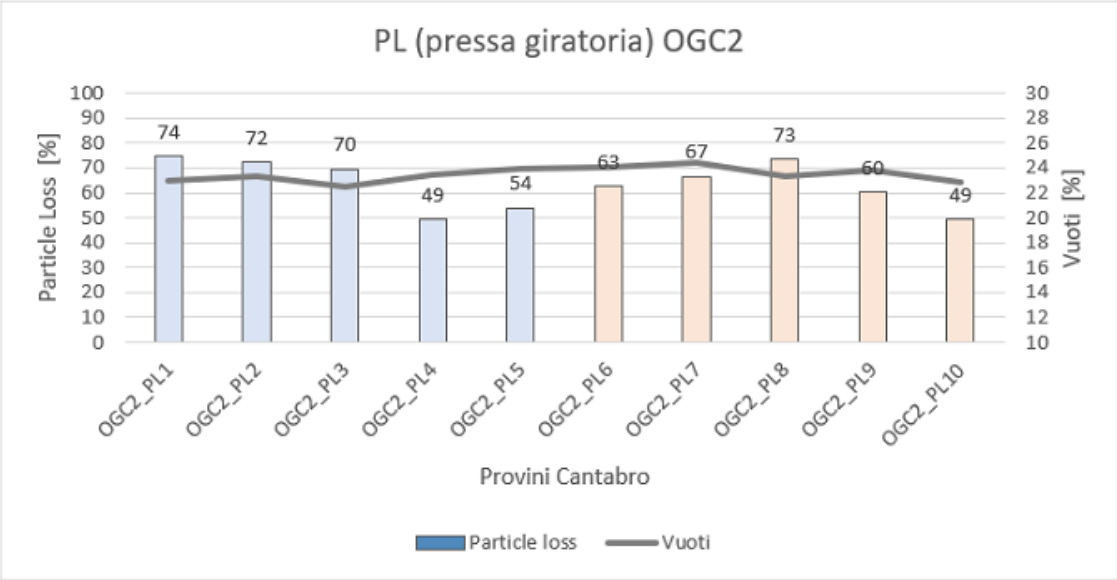

Figura 4.5: Grafico valori PL (provini compattati con pressa giratoria)

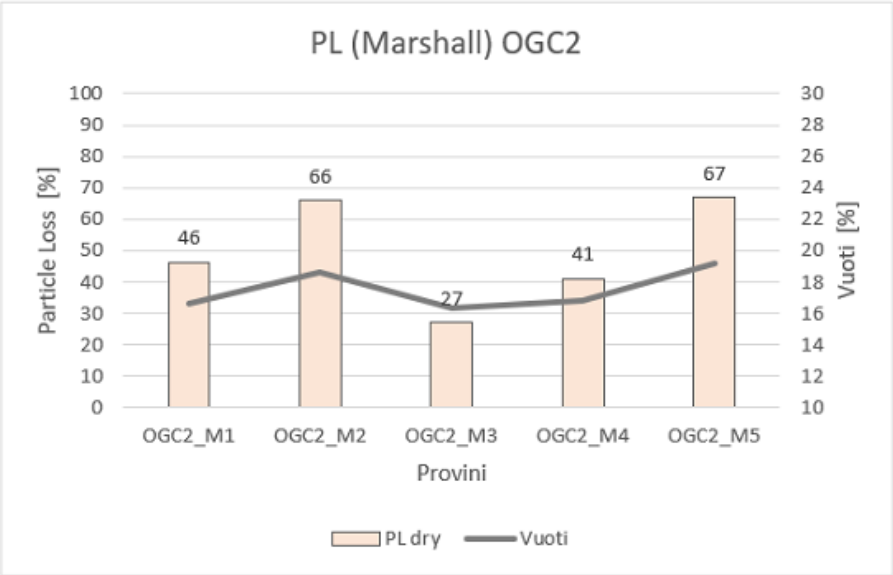

Figura 4.6: Grafico valori PL (provini compattati con pressa Marshall)

-Miscela OGC3:

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
W	OGC3_PL1	968,00	556,70	41
W	OGC3_PL2	971,50	557,40	41
W	OGC3_PL3	967,70	337,20	65
W	OGC3_PL4	966,90	423,40	56
W	OGC3_PL5	966,40	439,70	54
D	OGC3_PL6	947,50	419,20	55
D	OGC3_PL7	949,40	277,40	70
D	OGC3_PL8	954,30	294,60	69
D	OGC3_PL9	952,60	115,40	87
D	OGC3_PL10	949,70	368,20	61

	Provino	W1	W2	PL
	/	[g]	[g]	[%]
D	OGC3_M1	1070,00	864,70	19
D	OGC3_M2	1103,10	820,50	26
D	OGC3_M3	1085,40	862,20	21
D	OGC3_M4	1077,50	850,20	21
D	OGC3_M5	1100,60	856,40	22
D	OGC3_M6	1072,30	757,80	29

Tabella 4.7: Valori di Particle Loss

PL wet	Dev. Sta.	PL dry	Dev. Sta.
[%]	[%]	[%]	[%]
51,60	11,10	69,00	12,20

PL medio	Dev. Sta.
[%]	[%]
23	3,78

Tabella 4.8: Valori medi di particle loss e deviazione standard. Provini compattati con pressa giratoria (sinistra) e provini compattati con pressa Marshall (destra)

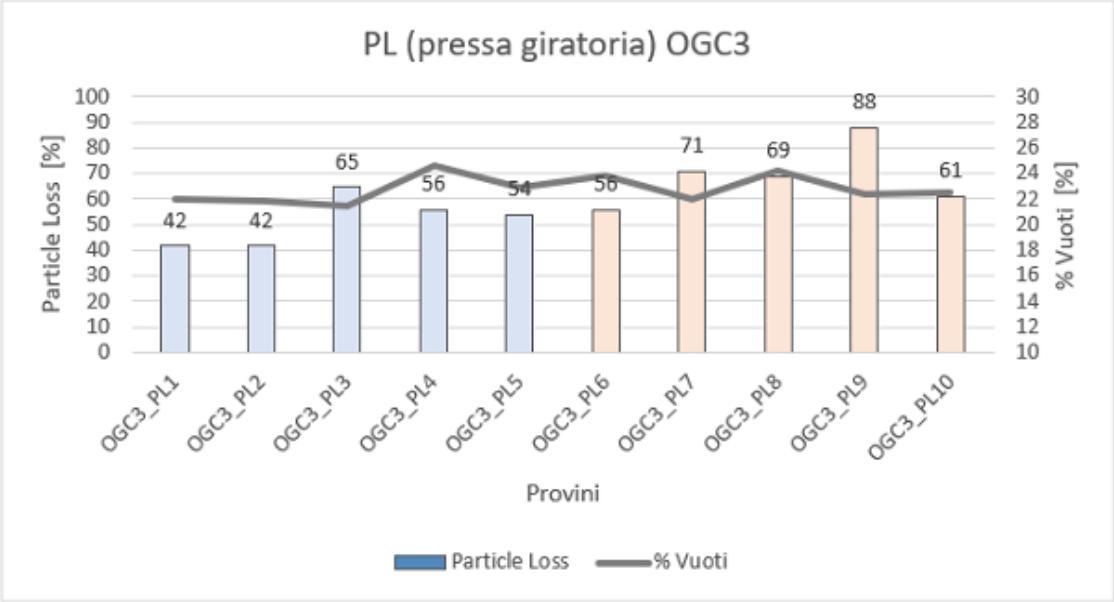

Figura 4.7: Grafico valori PL (provini compattati con pressa giratoria)

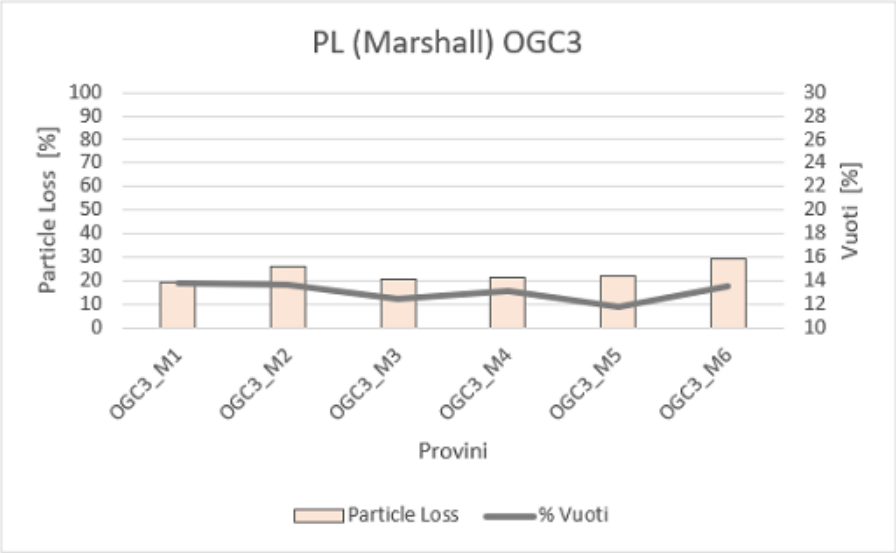

Figura 4.8: Grafico valori PL (provini compattati con pressa Marshall)

Si analizzano prima di tutto i valori di particle loss, facendo una distinzione tra provini compattati con pressa giratoria e provini compattati con

metodo Marshall, dove è possibile notare una certa differenza dei risultati. In particolar modo per quanto riguarda i provini compattati con pressa giratoria, i valori di particle loss risultano essere molto alti, con valori medi fino al 70%. Mentre, per quanto riguarda i provini compattati con metodo Marshall, i valori di PL si presentano più bassi e risultano essere prossimi al limite consentito indicato (l'unica eccezione, in questo caso, riguarda la miscela OGC2 con un valore medio di PL pari al 50%).

Inoltre bisogna considerare che, la differenza di percentuale dei vuoti (riportata sull'asse secondario nei grafici) tra provini compattati con un metodo e provini compattati con l'altro metodo, è sostanziale (tabelle misure dei provini §3.4). In particolare, con il metodo di compattazione con pressa giratoria si ha mediamente una percentuale di vuoti di circa il 23% (raggiungendo massimi del 25%), mentre per quanto riguarda il metodo di compattazione Marshall, la percentuale dei vuoti in media è di circa il 15% (con valore massimo del 19%). Questo fattore potrebbe incidere particolarmente sulla differenza di valori PL ricavati con i diversi metodi di compattazione.

Facendo poi un confronto tra provini wet e dry compattati con pressa giratoria, è possibile notare che: i valori medi di particle loss non sembrano avere grosse differenze a seconda del tipo di condizionamento e, in particolare, nelle miscele OGC1 e OGC3 i valori di PL wet sembrano essere addirittura inferiori dei valori di PL dry (Fig. 4.9). Questo indica che il condizionamento umido considerato non incide in modo significativo sulla perdita di peso.

In seguito si riportano i grafici che indicano l'andamento dei valori medi di PL delle singole miscele e il confronto tra serie wet e dry:

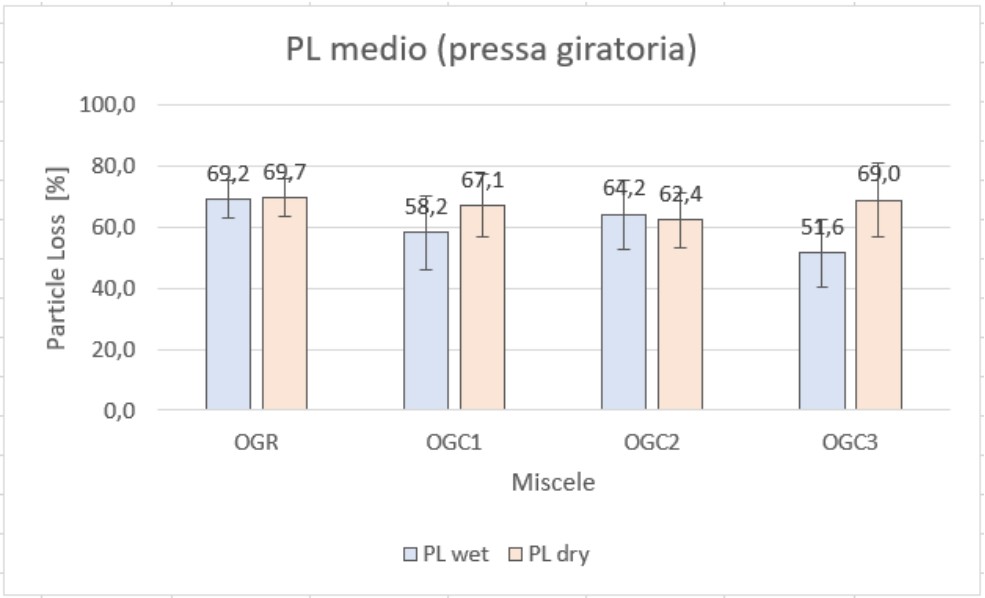

Figura 4.9: Grafico valori medi di PL e deviazione standard

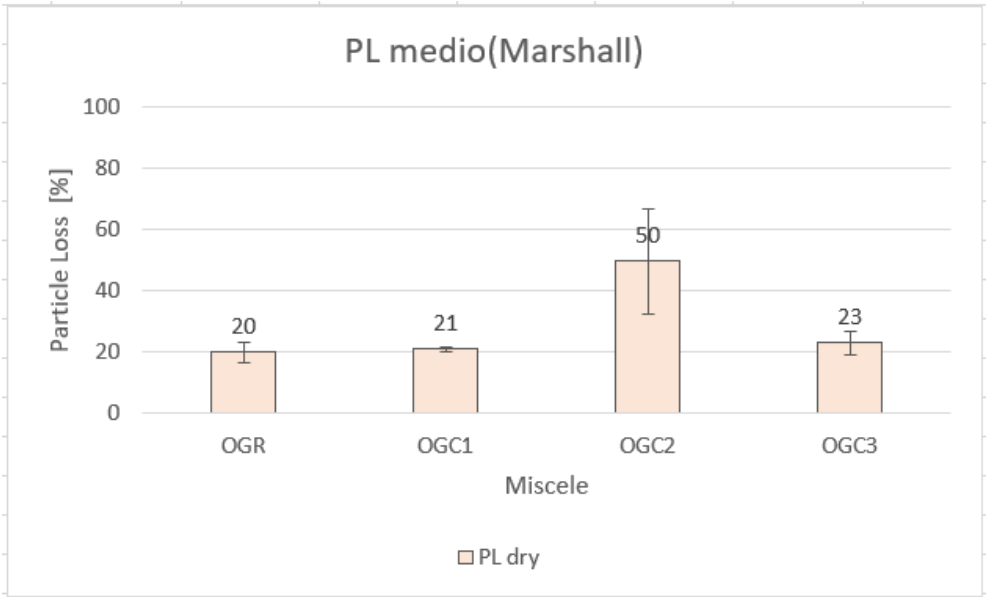

Figura 4.10: Grafico valori medi di PL Marshall e deviazione standard

In questi grafici sono state riportate, per ogni miscela, le barre di errore che rappresentano la deviazione standard. Come è possibile notare dal

grafico dei valori medi di PL (provini compattati con pressa giratoria, fig. 4.9), la dispersione dei valori non permette di fare un confronto tra le diverse miscele. Mentre, per quanto riguarda il grafico dei valori medi di PL Marshall (fig. 4.10) si ha una maggiore dispersione nel caso della miscela OGC2, caratterizzata dal 7% in peso di compound, a differenza delle altre miscele che presentano una deviazione standard molto bassa; per le miscele OGR,OGC1 e OGC3 il valore medio di PL è molto simile, intorno al 20%. Per la miscela OGC2, invece, il valore medio di PL risulta essere sensibilmente maggiore(50%). I risultati ottenuti per la miscela OGC2, caratterizzati da un valore medio di PL fuori trend e da una deviazione standard molto alta, sono anomali e probabilmente ascrivibili alla fase di preparazione dei provini.

In generale, i risultati delle prove Cantabro effettuate su provini Marshall sembrano indicare che l'utilizzo di un bitume non modificato insieme all'aggiunta del compound non penalizza la perdita di peso rispetto alla miscela di riferimento OGR.

4.3 Prova di trazione indiretta

La prova di trazione indiretta è stata eseguita su un totale di 32 provini (§3.1, tab. 3.2) , compattati esclusivamente con pressa giratoria. In questo caso i provini sono caratterizzati da un grado di addensamento maggiore, essendo stati compattati a 130 giri.

Per la prova in oggetto, un elevato valore dell'indice ITS sta ad indicare una maggiore resistenza del provino e, di conseguenza, un elevato carico di rottura.

Sono stati riportati in tabella, così come per il caso precedente, i valori ricavati dai test effettuati sui vari provini e, in particolare, oltre all'indice ITS, è stato esposto anche l'indice CTI (coefficiente di trazione indiretta). Entrambi gli indici sono stati poi riportati in valori medi e suddivisi in wet e dry.

Si specifica che nel caso in esame, a differenza dalle prova Cantabro, i provini sono 8 per ogni miscela, dei quali: 4 condizionati wet e 4 condizionati dry (§3.1, tab.3.2).

- Miscela OGR:

	Provino	D	$\delta c/D$	P	ITS	CTI
	/	[mm]	[/]	[kN]	[MPa]	[MPa]
W	OGR_IT1	100	0,023064	6,641337	0,69	46,7
W	OGR_IT2	100	0,025777	6,823708	0,68	41,1
W	OGR_IT3	100	0,022369	7,000000	0,69	48,7
W	OGR_IT4	100	0,022515	6,860182	0,67	46,8
D	OGR_IT5	100	0,022491	6,000000	0,58	40,6
D	OGR_IT6	100	0,020046	6,352584	0,62	48,7
D	OGR_IT7	100	0,021344	6,264437	0,62	45,5
D	OGR_IT8	100	0,017475	6,659574	0,65	58,5

Tabella 4.9: Valori ITS

$ITS_w medio$	$ITS_D medio$	$CTI_w medio$	$CTI_D medio$	ITSR
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
0,68	0,62	45,8	48,3	110,1

Tabella 4.10: Valori medi ITS e CTI

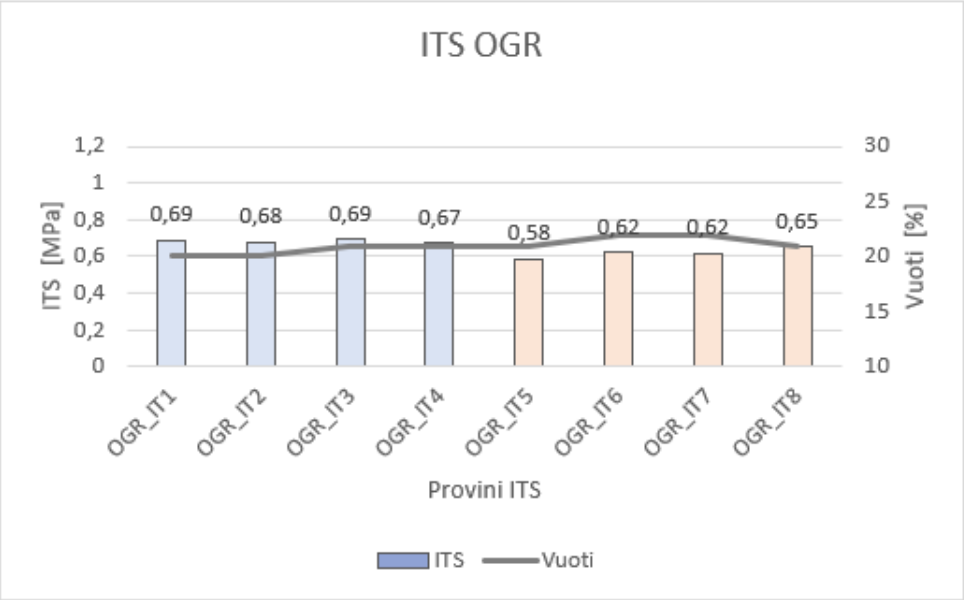

Figura 4.11: Grafico andamento valori ITS in relazione alla percentuale di vuoti

- Miscela OGC1:

	Provino	D	$\delta c/D$	P	ITS	CTI
	/	[mm]	[/]	[kN]	[MPa]	[MPa]
W	OGC1_IT1	100	0,024106	9,686930	1,01	65,9
W	OGC1_IT2	100	0,025166	11,610112	1,23	76,5
W	OGC1_IT3	100	0,023530	10,775893	1,13	75,7
W	OGC1_IT4	100	0,018558	9,003040	0,94	79,4
D	OGC1_IT5	100	0,016557	9,902735	1,04	98,9
D	OGC1_IT6	100	0,020612	9,480243	0,97	74,2
D	OGC1_IT7	100	0,023867	10,229994	1,07	70,5
D	OGC1_IT8	100	0,019553	9,401216	0,98	79,0

Tabella 4.11: Valori ITS

$ITS_w medio$	$ITS_D medio$	$CTI_w medio$	$CTI_D medio$	ITSR
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1,08	1,02	74,4	80,6	105,9

Tabella 4.12: Valori medi

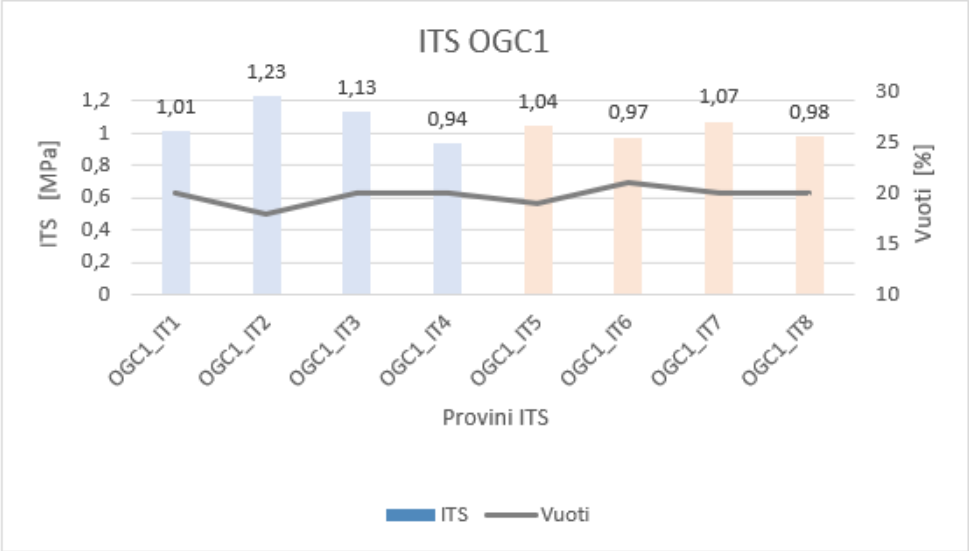

Figura 4.12: Grafico andamento valori ITS in relazione alla percentuale di vuoti

- Miscela OGC2:

	Provino	D	$\delta c/D$	P	ITS	CTI
	/	[mm]	[/]	[kN]	[MPa]	[MPa]
W	OGC2_IT1	100	0,021652	9,106383	0,95	69,1
W	OGC2_IT2	100	0,022782	10,058415	1,05	72,1
W	OGC2_IT3	100	0,021090	8,480243	0,89	66,1
W	OGC2_IT4	100	0,022561	10,439338	1,09	76,0
D	OGC2_IT5	100	0,019819	9,151976	0,96	75,8
D	OGC2_IT6	100	0,018956	9,018237	0,93	76,7
D	OGC2_IT7	100	0,017415	9,802317	1,03	92,9
D	OGC2_IT8	100	0,018212	9,267477	0,96	82,9

Tabella 4.13: Valori ITS

$\mathrm{ITS}_w medio$	$\mathrm{ITS}_D medio$	$\mathrm{CTI}_w medio$	$\mathrm{CTI}_D medio$	ITSR
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
0,99	0,97	70,8	82,1	102,6

Tabella 4.14: Valori medi

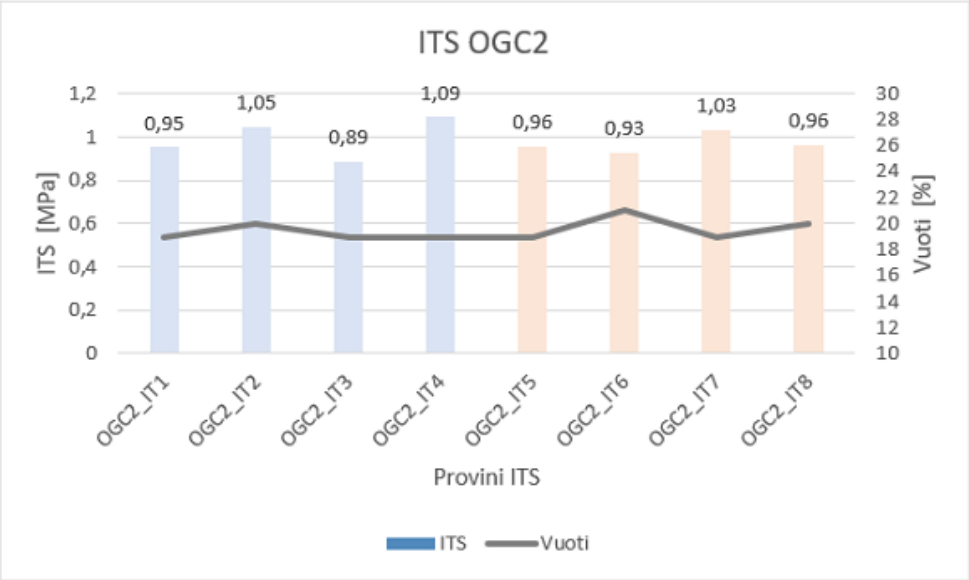

Figura 4.13: Grafico andamento valori ITS in relazione alla percentuale di vuoti

- Miscele OGC3:

	Provino	D	$\delta c/D$	P	ITS	CTI
	/	[mm]	[/]	[kN]	[MPa]	[MPa]
W	OGC3_IT1	100	0,024672	10,097201	1,07	68,19
W	OGC3_IT2	100	0,016256	9,607903	0,99	95,66
W	OGC3_IT3	100	0,018101	10,127480	1,05	90,68
W	OGC3_IT4	100	0,017570	10,625029	1,10	98,16
D	OGC3_IT5	100	0,017919	9,468085	1,01	88,10
D	OGC3_IT6	100	0,016765	9,802431	1,03	96,60
D	OGC3_IT7	100	0,014487	9,167173	0,97	104,96
D	OGC3_IT8	100	0,02156	9,024316	0,94	68,41

Tabella 4.15: Valori ITS

$ITS_w medio$	$ITS_D medio$	$CTI_w medio$	$CTI_D medio$	ITSR
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1,05	0,99	88,2	89,5	106,6

Tabella 4.16: Valori medi

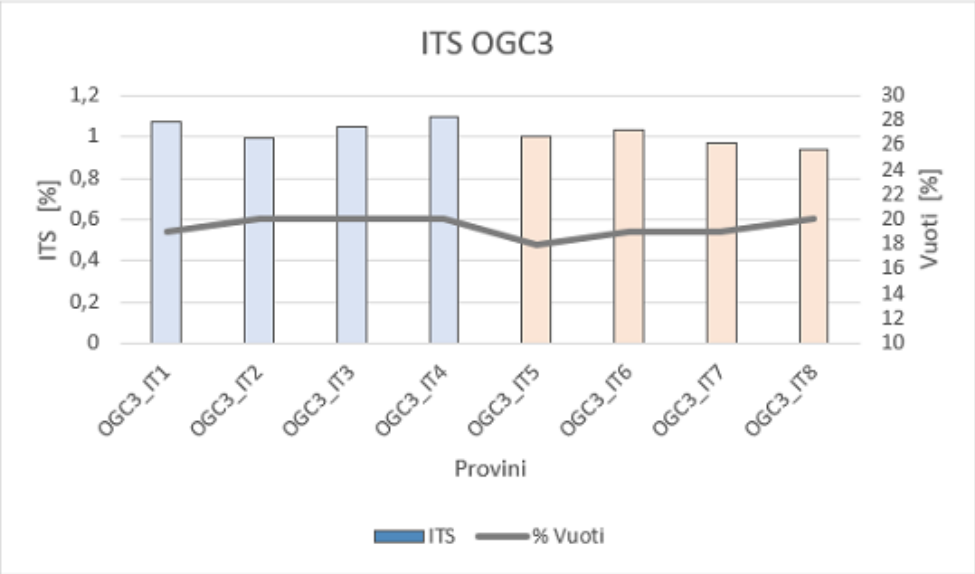

Figura 4.14: Grafico andamento valori ITS in relazione alla percentuale di vuoti

In seguito si mostra un grafico riassuntivo dell'andamento dei valori medi dell'indice ITS per ogni miscela, evidenziando il confronto di provini wet e dry:

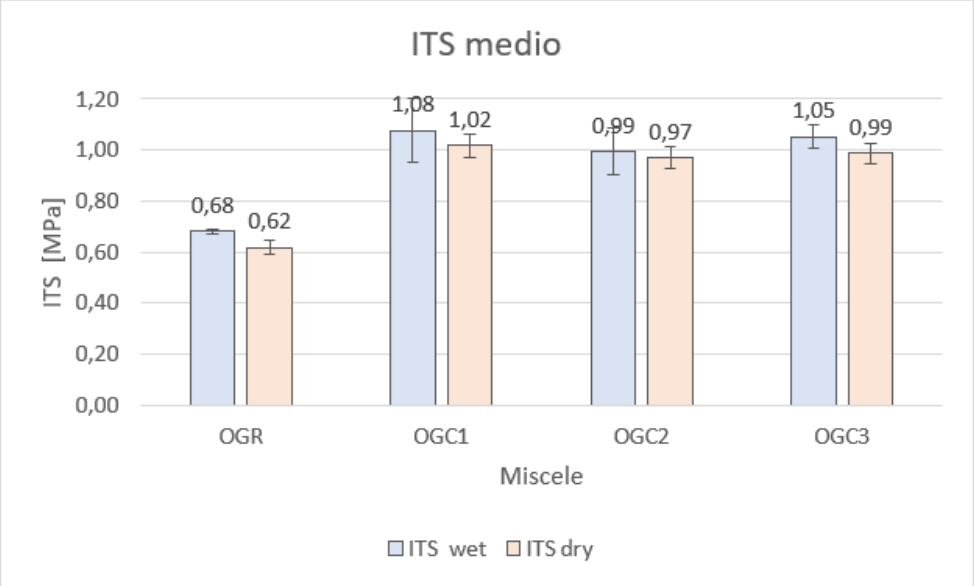

Figura 4.15: Grafico valori medi ITS e deviazione standard

Facendo un'analisi del confronto tra miscele, si è riscontrato che i conglomerati modificati con compound presentano valori più alti di ITS, che si aggirano intorno a 1,00 MPa, rispetto alla miscela di riferimento, che è caratterizzata da un valore di resistenza a trazione indiretta intorno a 0,65 MPa. In particolare, per miscele modificate con compound, il valore di ITS si mantiene pressoché costante, indipendentemente dalla percentuale di compound. Questo risultato potrebbe essere dovuto al fatto che in una miscela drenante i punti di contatto tra gli aggregati sono pochi. In tal senso, aggiungere il compound con dosaggi superiori al 5% non sembra comportare alcun beneficio ulteriore in termini di resistenza a trazione indiretta.

Inoltre nel grafico in fig. 4.15 sono state riportate anche le barre di errore, che rappresentano la deviazione standard. Da questo è possibile notare come la miscela di riferimento sia caratterizzata, seppur con valori leggermente più bassi, da una dispersione di valori limitata rispetto le altre miscele. Questo potrebbe dipendere dal fatto che la modifica con bitume SBS (PmB) sia omogenea in tutta la miscela, a differenza della modifica con compound (PmA), in cui il compound potrebbe non essere omogeneamente disperso

nella miscela.

Per quanto riguarda le serie di provini wet e dry, anche in questo caso non sembrano esserci grosse differenze e tendenzialmente i provini wet risultano avere valori ITS leggermente maggiori dei provini dry. Quindi è possibile affermare che il condizionamento umido considerato non influisce sulla resistenza meccanica dei conglomerati analizzati.

Capitolo 5

Conclusioni

Nella sperimentazione presentata è stato possibile, attraverso la prova Cantabro e la prova di trazione indiretta, mettere a confronto il comportamento meccanico di miscele drenanti modificate con due principi differenti, al fine di valutare l'efficacia del metodo di modifica dry rispetto il metodo wet (comunemente utilizzato); l'impiego del metodo dry dà la possibilità di avere dei notevoli benefici in termini di impatto ambientale, in quanto il compound polimerico al grafene utilizzato permette di smaltire materiali destinati a termovalorizzatori e la produzione del materiale stesso risulta essere innovativa ed ecosostenibile.

Inoltre trattandosi di miscele aperte e, quindi, sensibili agli agenti atmosferici, è stato necessario analizzare se la presenza dell'acqua potesse in qualche modo penalizzare il comportamento meccanico dei diversi provini.

In particolare sono state confezionate quattro miscele drenanti, tra le quali una è stata modificata con metodo wet e quindi utilizzando un bitume modificato SBS hard (miscela OGR necessaria al confronto) e tre modificate con metodo dry utilizzando diverse quantità di compound polimerico al grafene e confezionate con bitume tradizionale 50/70 (OGC1 con il 5% di compound, OGC2 con il 7%, OGC3 con il 9%). E' stato inoltre opportuno ricavare, tra le diverse miscele modificate con compound, il quantitativo

ottimale dell'agente modificante.

Pertanto, in seguito all'analisi effettuata e presentata in dettaglio nei precedenti capitoli, è possibile esporre le seguenti conclusioni:

- Dai risultati inizialmente ottenuti dalla prova Cantabro effettuata su provini compattati con pressa giratoria a giri imposti, non è stato possibile esprimere un giudizio significativo, in quanto i risultati ottenuti dal test sono molto variabili e, quindi, caratterizzati da una certa dispersione dei dati. Tuttavia, analizzando in seguito i valori di particle loss della prova Cantabro effettuata invece su provini compattati con metodo Marshall (a vuoti più bassi), è stato possibile fare un confronto tra le varie miscele e, pertanto, si è arrivati alla conclusione che il metodo di compattazione incide fortemente sui risultati di particle loss. Sarebbe quindi opportuno compattare i provini a vuoti controllati, sebbene questo non sia previsto dalle norme e dai protocolli di riferimento considerati.

- Le prove Cantabro effetuate su provini Marshall (condizionamento dry) hanno condotto ad una perdita di peso del tutto analogo per le miscele OGR, OGC1 e OGC3, intorno al 20% (valore massimo considerato accettabile). Tali miscele hanno inoltre mostrato una ridotta dispersione dei risultati. Per la miscela OGC2, invece, sono stati ottenuti risultati anomali, forse legati alla preparazione dei provini. Complessivamente l'utilizzo di un bitume non modificato insieme all'aggiunta di compound non sembra penalizzare la perdita di peso rispetto alla miscela di riferimento OGR.

- Le prove di trazione indiretta hanno evidenziato valori ITS del tutto analoghi per le miscele con il compound (cira 1 MPa) indipendentemente dal dosaggio del compound, maggiori rispetto alla resistenza della miscela OGR (0,65 MPa). La dispersione dei risultati è stata contenuta per tutte le miscele.

- Dal confronto dei valori ricavati da entrambe le prove effettuate su provini condizionati wet (in acqua a 40°C) e provini condizionati dry (in camera climatica a 25°C), è stato possibile osservare che i valori wet sono tendenzialmente pari o maggiori dei valori dry. Pertanto il condizionamento umido considerato non sembra penalizzare le caratteristiche meccaniche delle miscele analizzate.

- Tra le miscele modificate con compound, si può notare che le risposte meccaniche sono pressoché simili e, in specifico, la miscela a minor contenuto di compound (miscela OGC1 con 5% di compound) ha un comportamento meccanico analogo a quello della miscela a maggior contenuto di compound (miscela OGC3 con 9% di compound). Quindi si può affermare che, a parità di prestazioni meccaniche e al fine di ottimizzare l'uso del materiale modificante, è possibile impiegare la minor percentuale di utilizzo pari al 5%.

In conclusione i risultati di questo studio sono promettenti e suggeriscono che l'impiego del metodo di modifica dry, con l'uso del compound polimerico al grafene per la produzione di miscele drenanti, permette di ricavare delle prestazioni meccaniche paragonabili o superiori rispetto alle miscele modificate con metodo wet, confezionate con bitume modificato SBS hard. Tuttavia, prima di arrivare a conclusioni definitive circa l'impiego di tali materiali, sono necessari ulteriori studi e approfondimenti.

Bibliografia

[1] Strade e autostrade *Supermodificanti a base di grafene per ecosostenibilità e pavimentazioni perpetue.*

[2] So.F.teR. *Pavprene, compound SBS.*

[3] UNI EN 12697-30 *Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 30: Preparazione del provino mediante compattazione a impatto.*

[4] UNI EN 12697-12 *Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 12: Determinazione della sensibilità all'acqua dei provini bituminosi.*

[5] UNI EN 12697-17 *Bituminous mixtures - test methods - Parte 17: Particle loss of porous asphalt specimens.*

[6] UNI EN 12697-23 *Bituminous mixtures - test methods - Parte 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.*