



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

Caratterizzazione meccanica di miscele bituminose chiuse ed  
aperte modificate con compound polimerici

Mechanical characterization of dense- and open-graded  
bituminous mixtures modified with  
polymer-based compounds

Relatore:

Prof. Ing. Francesco Canestrari

Tesi di laurea di:

Raffaello Ascone Modica

---

Anno Accademico 2019 - 2020

# INDICE

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1	
MATERIALI.....	3
1.1 La Pavimentazione Stradale.....	3
1.2 Il Conglomerato Bituminoso.....	4
1.2.1 Aggregati Lapidei.....	8
1.2.2 Bitume.....	9
1.2.3 Filler.....	12
1.2.4 Agenti Modificanti.....	13
1.2.4.1 Polimeri.....	14
1.2.4.2 PmB (Metodo Wet) e PmA (Metodo Dry).....	15
1.2.4.3 Grafene.....	17
1.2.5 La Compattazione dei Conglomerati Bituminosi.....	19
CAPITOLO 2	
INDAGINE SPERIMENTALE.....	21
2.1 Introduzione.....	21
2.2 Materiali Analizzati.....	22
2.3 Prova di Trazione Indiretta.....	27
2.3.1 Determinazione ITS.....	28
2.4 Prova Cantabro.....	35
2.4.1 Determinazione PL.....	36

## CAPITOLO 3

ANALISI DEI RISULTATI.....	39
3.1 Prova di Trazione Indiretta.....	39
3.1.1 Miscela Strato di Base.....	40
3.1.2 Miscela Strato Drenante.....	48
3.2 Prova Cantabro.....	53

## CAPITOLO 4

CONCLUSIONI.....	58
BIBLIOGRAFIA.....	60

## INTRODUZIONE

Lo studio e la progettazione della pavimentazione stradale si pone come obiettivo primario l'analisi sia strutturale che funzionale, in relazione alle condizioni in esercizio. È necessario garantire durabilità nell'arco della vita utile della pavimentazione sia da cause antropiche che ambientali.

L'importanza della progettazione di una buona rete stradale risale all'Impero Romano. Le strade, pressoché rettilinee, hanno garantito infatti all'Impero Romano la più grande espansione mai vista dall'uomo, usate come mezzo per garantire dominio, oltre che politico e militare, anche commerciale. Fra gli appellativi più di spicco, con cui si glorificavano gli Imperatori, prevaleva quello di *Curator viarum*.

I Romani furono i primi che adoperarono uno studio della rete stradale, cercando di garantire durabilità e soprattutto a fondare un primo modello di pavimentazione stradale, costituita da differenti strati assortiti.

Dopo la caduta dell'Impero Romano, le strade andarono in disuso, fino a rompersi ed a costituire un vero appellativo della strada odierna. Infatti, strada in francese si dice *route*, come pure in inglese ed entrambi derivano dal latino *via rupta*, cioè in italiano *strada rotta*. Rotta come lo erano le strade rettilinee che si indicavano, usciti da una città, le quali fornivano il minor tragitto possibile per la destinazione desiderata. Deriva pure da ciò l'appellativo di rotta navale.

*“Caratterizzazione meccanica di miscele bituminose chiuse ed aperte modificate con compound polimerici”*

La caratterizzazione meccanica dei conglomerati bituminosi ha come obiettivo l'analisi e la misura delle proprietà di rigidezza e resistenza, nei confronti dei meccanismi di rottura e degrado che esso subisce nell'arco della sua vita utile.

Il conglomerato bituminoso reagisce a determinate condizioni di carico e temperatura mediante proprietà viscoso, elastiche e plastiche.

Al fine di un buon progetto bisogna capire a fondo tutti i meccanismi che si generano all'interno del conglomerato bituminoso, imponendo le opportune condizioni al contorno nei confronti del carico e delle temperature che esso subisce durante la posa in opera e la sua vita utile.

Lo scopo di questa tesi mira all'analisi e alla messa a confronto di diversi tipi di miscele, chiuse e aperte (definite tali a seconda della quantità di vuoti al loro interno), modificate con compound polimerici, utilizzando diversi metodi.

Al fine di rendere meglio l'idea di quello di cui si tratta, la tesi si sviluppa in due parti principali; una prima che descrive nel dettaglio i materiali su cui è stata fatta l'analisi (Capitolo 1), e una seconda parte che prevede la descrizione dell'indagine sperimentale svolta in laboratorio (Capitolo 2) e la messa a confronto dei rispettivi risultati ottenuti (Capitolo 3 e 4).

# CAPITOLO 1

## MATERIALI

### 1.1 LA PAVIMENTAZIONE STRADALE

Soffermandoci solo sulle caratteristiche principali, una pavimentazione stradale, o sovrastruttura, costituisce l'insieme di strati finale del corpo stradale. Quest'ultimo è stratificato nel seguente modo:

- Piano di posa
- Anticapillare, che impedisce la risalita di acqua di falda passante al di sotto del corpo stradale
- Eventuale rilevato stradale (e annesse tecniche costruttive)
- Sottofondo, sul quale si ha ancora la sensibilità delle sollecitazioni dovute al traffico stradale trasmesse dalla pavimentazione
- Ulteriore strato anticapillare
- Pavimentazione stradale

Quindi, come accennato nella descrizione del sottofondo, la pavimentazione stradale è il volume parziale del corpo stradale sul quale si distribuiscono le sollecitazioni cicliche dovute al traffico.

Le pavimentazioni stradali si distinguono in flessibili, semirigide e rigide. Esse variano principalmente in funzione del legante utilizzato. Le pavimentazioni flessibili utilizzano un legante idrocarburico (Bitume), mentre le rigide un legante idraulico (Cemento). Il tipo di pavimentazione riguardante questa tesi è quella flessibile.

La pavimentazione deve avere una buona durabilità ed inoltre, deve essere regolare a avere una buona aderenza ed assorbire il più possibile il rumore, derivato dal rollio degli pneumatici.

La caratteristica più importante della pavimentazione stradale è la capacità di distribuire le sollecitazioni subite ai vari strati di cui essa si suddivide, i quali sono:

- Usura: costituita da conglomerato bituminoso chiuso o aperto ed eventuali trattamenti superficiali. Ha le funzioni di aderenza, regolarità e alta resistenza al taglio. In questa tesi si sono prese in esame miscele destinate allo strato d'usura drenante, cioè miscele con porosità maggiore rispetto a conglomerati d'usura tradizionali (circa > 15%), caratterizzate da una elevata rugosità superficiale, buona aderenza nel bagnato e smorzamento del rumore, causato dal rotolamento dello pneumatico
- Binder: costituito da conglomerato bituminoso. Ha la funzione di collegamento
- Base: costituito da conglomerato bituminoso chiuso, misti cementati. Ha la funzione di ripartizione dei carichi
- Fondazione: Costituita da misti granulari e terre stabilizzate. Ha la funzione di trasmissione dei carichi al sottofondo

L'insieme della base e la fondazione costituiscono il volume della pavimentazione stradale su cui si distribuiscono i carichi, non considerando quelli che influenzano i primi due strati (usura e binder), sia perché hanno uno spessore molto minore sia perché sono di valori trascurabili rispetto ai carichi a cui sono soggetti la base e la fondazione.

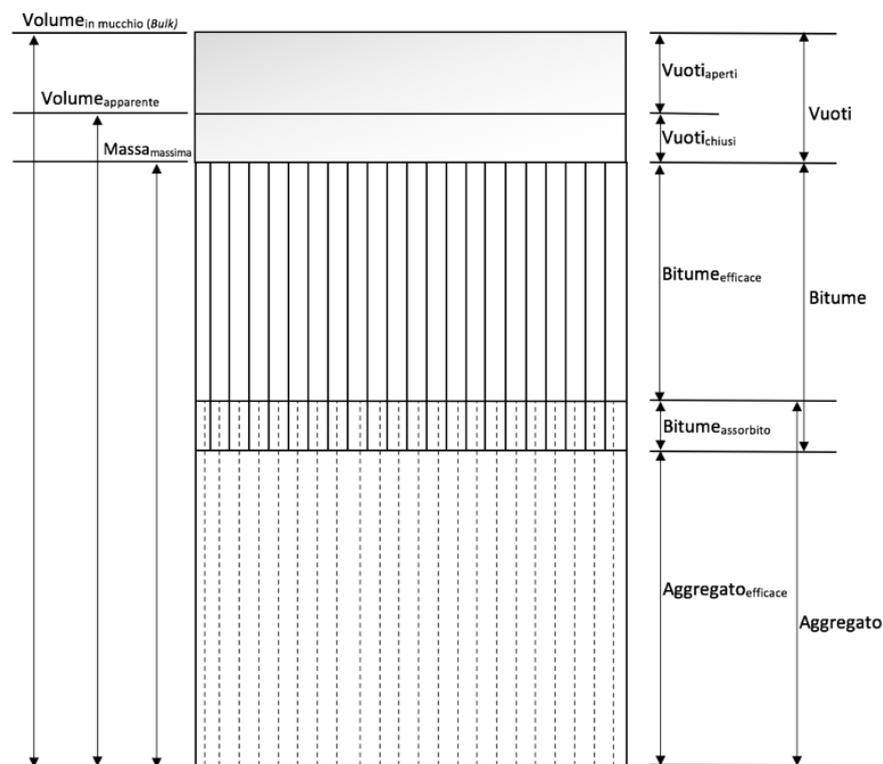
## 1.2 IL CONGLOMERATO BITUMINOSO

Il conglomerato bituminoso è un materiale composito costituito essenzialmente da una miscela di aggregati lapidei, filler (frazione più fine dell'assortimento granulometrico 0,063 ÷ 0,075 mm), legante bituminoso, agenti modificanti ed eventualmente conglomerato bituminoso di recupero o anche detto fresato (*RAP Reclaimend Asphalt Pavement*).

La composizione del conglomerato bituminoso varia in base alla destinazione d'uso, in relazione ai differenti strati di cui è composta la pavimentazione stradale (usura, binder, base), variando caratteristiche volumetriche e meccaniche.

Tenendo presente che il conglomerato bituminoso è un materiale composito, le prestazioni di esso sono anche determinate dalle caratteristiche volumetriche, mediante le varie combinazioni che si possono ottenere fra i volumi in bitume, aggregato e vuoti presenti.

Si guardino le varie partizioni esistenti nella figura sottostante (*Figura 1.1*).



*Figura 1.1*

*Partizioni esistenti all'interno del conglomerato bituminoso*

L'aggregato lapideo, con una propria porosità interna e superficiale, è ricoperto dal legante, costituito dal bitume. Nella porosità superficiale la parte più interna è permeabile all'acqua ma non al legante (*Figura 1.2*), mentre la parte più esterna è penetrabile dal bitume (bitume assorbito).

La superficie dell'aggregato saturo di bitume infine è ricoperta dal bitume (bitume efficace), quest'ultima è la parte di bitume che lega tutti gli aggregati presenti nel conglomerato.

In più fra gli aggregati ricoperti di bitume vi sono dei vuoti, che costituiscono i vuoti chiusi del conglomerato bituminoso. Mentre la porosità del conglomerato bituminoso permeabile all'acqua è data dai vuoti aperti.

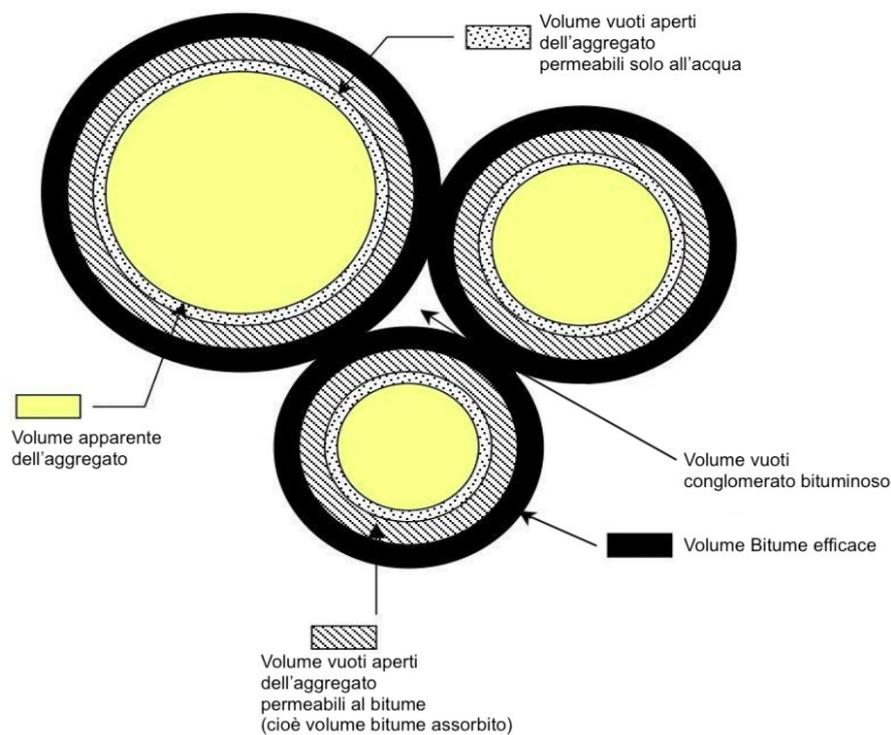


Figura 1.2

*Configurazione della coesione Bitume - Aggregato*

Per determinare la massa volumica in mucchio (*Bulk density*) dei conglomerati bituminosi vi sono diverse metodologie, alcune delle quali sono descritte di seguito.

La massa volumica con metodo geometrico [UNI EN 12697-6] si calcola misurando la geometria ed il peso del provino, in conglomerato bituminoso asciutto  $m_1$  [g], con una bilancia.

Per provini cilindrici la formulazione è la seguente:

$$\rho_{geom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} h d^2} \cdot 10^3$$

In cui:

$\rho_{geom}$  = Massa volumica geometrica [g/cm<sup>3</sup>]

$m_1$  = Massa secca provino [g]

$h$  = Altezza provino [mm]

$d$  = Diametro provino [mm]

La massa volumica con metodo dry [UNI EN 12697-6] si calcola pesando il provino asciutto  $m_1$  [g] con una bilancia e pesando il provino immerso in acqua  $m_2$  [g].

Per provini cilindrici la formulazione è la seguente:

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

In cui:

$\rho_{dry}$  = Massa volumica con metodo dry [g/cm<sup>3</sup>]

$m_1$  = Massa secca provino [g]

$m_2$  = Massa provino in acqua [g]

$\rho_w$  = Massa volumica acqua alla temperatura di prova  $t$  [°C] [UNI EN 12697-5]  
[g/cm<sup>3</sup>]

$$= 1,00025205 + \frac{7,59 \cdot t - 5,32 \cdot t^2}{10^6}$$

Di conseguenza si può ricavare il volume dei vuoti percentuale sia dal metodo geometrico sia dal metodo dry:

$$\%Vuoti_{geom} = \frac{\rho_m - \rho_{geom}}{\rho_m} \cdot 100$$

In cui:

$\%Vuoti_{geom}$  = Percentuale dei vuoti geometrici presenti nella miscela

$\rho_{geom}$  = Massa volumica geometrica [g/cm<sup>2</sup>]

$\rho_m$  = Massa volumica massima della miscela [g/cm<sup>2</sup>]

La  $\rho_m$  calcolata con metodo matematico è:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{\%_{aggregato}}{\gamma_{aggregato}} + \frac{\%_{bitume}}{\gamma_{bitume}}}$$

In cui:

$\%_{aggregato}$  = Contenuto di aggregati nella miscela [%]

$\gamma_{aggregato}$  = Massa volumica apparente aggregati [g/cm<sup>2</sup>]

$\%_{bitume}$  = Contenuto di bitume nella miscela [%]

$\gamma_{bitume}$  = Peso specifico del bitume [g/cm<sup>2</sup>]

$$\%Vuoti_{dry} = \frac{\rho_m - \rho_{dry}}{\rho_m} \cdot 100$$

In cui:

$\%Vuoti_{dry}$  = Percentuale dei vuoti dry presenti nella miscela

$\rho_{dry}$  = Massa volumica con metodo dry [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_m$  = Massa volumica massima della miscela [g/cm<sup>2</sup>] (con metodo matematico)

Il conglomerato bituminoso varia principalmente in base all'assortimento granulometrico degli aggregati lapidei e alla percentuale di legante utilizzata.

### 1.2.1 AGGREGATI LAPIDEI

L'aggregato lapideo è presente all'interno del conglomerato bituminoso come fase solida. A seconda dello strato a cui il conglomerato fa riferimento, l'aggregato lapideo varia in origine litologica, geometria, proprietà fisiche, meccaniche e chimiche.

È importante inoltre, un buon assortimento granulometrico, ragion per cui si adottano distribuzioni granulometriche ottimali <sup>1</sup> e limiti predefiniti (*Tabella 1.1*). Tutto ciò, al fine di soddisfare le caratteristiche riguardanti lo specifico strato a cui si fa riferimento, adottando diametri massimi decrescenti, partendo da strati di base fino agli strati superiori.

## 1.2.2 BITUME

Il bitume è un legante idrocarburico. È il sottoprodotto residuo della distillazione frazionata del greggio petrolio in olio combustibile. Ha la funzione principale, oltre che di impermeabilizzante, di conferire alla miscela la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio, trazione e flessione. È un materiale termoplastico, cioè cambia consistenza e viscosità con la temperatura.

Inizialmente furono applicati bitumi naturali con la funzione di antipolverizzante, ottenuti dopo processi di filtraggio, trattamento chimico ed evaporizzazione dal petrolio.

Attualmente c'è una prima categoria di bitumi, propriamente detti, chiamati bitumi tradizionali, derivati dalla sola distillazione del petrolio.

La seconda categoria è data dai bitumi modificati, al fine di migliorare le caratteristiche reologiche del legante. Categoria di cui parleremo più approfonditamente in seguito, dopo avere introdotto gli agenti modificanti.

Il contenuto ottimale di legante bituminoso è fortemente legato alla superficie specifica dei granuli, i quali devono essere ricoperti dalla pellicola di legante con uno spessore adeguato. La superficie specifica, dipendente dall'assortimento granulometrico adottato, è direttamente proporzionale alla diminuzione del diametro delle particelle. Più la superficie specifica cresce, più si incrementa il quantitativo di legante necessario al ricoprimento dei granuli.

---

<sup>1</sup> Sulla base di specifiche funzioni come la distribuzione di Fuller  $P = 100 \left( \frac{d}{D_{max}} \right)^{0,45}$  in cui  $d$  e  $D_{max}$  sono i diametri degli aggregati.

Può presentarsi, come già accennato, un eventuale aggiunta di fresato RAP, derivato dalla demolizione (fresatura o scarifica) e successiva comminuzione di pavimentazioni stradali. Le percentuali di fresato accettate per ogni tipo di strato sono:

- $\leq 30$  % nello strato di base, il quale accetta fresati di qualsiasi provenienza
- $\leq 25$  % nel binder, il quale accetta fresati provenienti solo da altri binder o strati d'usura
- $\leq 20$  % nello strato d'usura, il quale accetta fresati provenienti solo da altri strati d'usura

Inoltre, per le pavimentazioni flessibili, sono rappresentati in (*Tabella 1.1*) i limiti predefiniti indicati per gli aggregati. A sinistra i diametri [mm] ed a destra la rispettiva quantità [%] da potere utilizzare, variabile per ogni tipo di strato. Ed i limiti per i leganti [%], compresa se prevista la percentuale di legante contenuta nei fresati, variabile per ogni tipo di strato.

Serie e setacci UNI EN	Passante totale % in peso			
	STRATO DI BASE	STRATO DI COLLEGAMENTO	STRATO DI USURA TIPO "A"	STRATO DI USURA TIPO "B"
31,5	100			
20	70 - 95	100		
16			100	
12,5	45 - 70	65 - 85	90 - 100	100
8	35 - 60	55 - 75	70 - 90	70 - 90
4	25 - 50	35 - 55	40 - 55	40 - 60
2	18 - 38	25 - 38	25 - 38	25 - 38
0,5	6 - 20	10 - 20	11 - 20	11 - 20
0,25	4 - 14	5 - 15	8 - 15	8 - 15
0,063	4 - 8	4 - 8	6 - 10	6 - 10

Contenuto Bitume (%)      (4.0 - 5.5)      (4.5 - 6.0)      (5.0 - 6.5)

*Tabella 1.1*

*Limiti aggregati e bitume*

I leganti bituminosi sono caratterizzati da un comportamento visco-elastico che varia in base al tempo di carico e alla temperatura. Presentano un comportamento elastico alle basse temperature e viscoso alle alte temperature.

La branca che si occupa del comportamento, così definito, di un materiale in condizioni di tempo di applicazione del carico e di temperatura, è la reologia, la quale studia le proprietà di flusso dei materiali. La reologia permette di studiare le caratteristiche reologiche del bitume, indipendentemente dall'origine e tipologia. Oltre lo studio razionale su cui si basa la reologia, convenzionalmente le caratteristiche reologiche del bitume sono identificate attraverso una serie di prove empiriche.

I metodi empirici nonostante non possano permettere di ricavare le proprietà fondamentali del bitume, non riuscendo a risalire al gradiente di deformazione imposto e allo stato di tensione applicato, e quindi non forniscono dei risultati esatti, come invece la reologia permette, continuano ad avere una loro significatività grazie alla grossa mole di dati sperimentali accumulati col tempo. In più le prove empiriche fanno ancora riferimento alle attuali norme europee di classificazione (*Tabella 1.2*).

Fra le varie prove empiriche esistenti, di seguito vengono elencate quelle presenti in questa tesi.

La prova di penetrazione [UNI EN 1426] permette di ricavare la consistenza del bitume a temperatura ambiente.

È composta da un ago metallico, di dimensioni e peso standard, che viene fatto penetrare all'interno di un campione di bitume, di dimensioni standard, alla temperatura di 25 °C.

Il valore risultante è dato dalla penetrazione dell'ago in decimi di millimetro [dmm].

La prova di rammollimento (o di Palla e Anello) [UNI EN 1427] fornisce il comportamento del bitume alle alte temperature di esercizio ed il passaggio da un comportamento visco-elastico ad un comportamento viscoso.

La prova si svolge all'interno di un contenitore riempito di un liquido condizionato ad una temperatura iniziale di 5 °C. Immersi nello stesso liquido, si svolgono due prove in contemporanea, ciascuna costituita da una sferetta metallica che sprofonda all'interno di un anello, dentro il quale è presente il

bitume. La sferetta trascina quindi con sé il bitume, il quale assume la configurazione di una goccia. All'avviamento della prova la temperatura viene alzata di 5 °C/min, causando una perdita di consistenza del bitume, che permette di far sprofondare la palla di metallo. La prova finisce ricavando la temperatura finale [°C] (30 ÷ 150 °C), appena la goccia di bitume raggiunge la profondità di 25,4 mm (un pollice). Il valore finale della prova è dato dalla media delle due temperature, ricavate dalle due prove.

BITUME			Tipo 50/70	Tipo 70/100
Parametro	Normativa	unità di misura	Valori richiesti	Valori richiesti
Penetrazione a 25°C	UNI EN1426	dmm	50-70	70 - 100
Punto di rammollimento	UNI EN1427	°C	46-54	43 - 51
Punto di rottura (Fraass)	UNI EN12593	°C	≤ - 8	≤ -10
Viscosità cinematica 135°C	UNI EN 12595	mm <sup>2</sup> /s	≥ 0,15	≥ 0,10
Solubilità	UNI EN12592	%	≥ 99	≥ 99
Incremento del punto di Rammollimento	UNI EN1427	°C	≤ 11	≤ 11
Valori dopo RTFOT (163°C)	UNI EN12607-1			
- Variazione di massa	UNI EN12607-1	%	≤ 0,5	≤ 0,8
- Penetrazione residua a 25°C	UNI EN1426	%	≥ 50	≥ 46
- Punto di rammollimento	UNI EN1427	°C	≥ 48	≥ 45

Tabella 1.2

*Limiti caratteristiche reologiche bitume*

### 1.2.3 FILLER

Diversamente dall'aggregato, il filler è posto come componente separato dal fuso granulometrico (pur facendo parte di una dimensione granulometrica). Questo perché ad un suo aumento non vi è un rispettivo aumento del legante (avendo il filler superficie specifica molto alta), ma bensì si unisce al legante stesso, partecipando insieme ad esso al ricoprimento dei granuli. Si forma un cosiddetto mastice bituminoso.

Perciò si ha che un aumento di filler comporta un altrettanto aumento della densità e rigidità della miscela. Prestando attenzione però a non ottenere un aumento eccessivo che comprometta la lavorabilità e la coesione bitume – aggregato.

## 1.2.4 AGENTI MODIFICANTI

Gli agenti modificanti sono sostanze naturali o artificiali che vengono aggiunte alla miscela o al bitume tradizionale, alterandone le caratteristiche reologiche, al fine quindi di migliorare le caratteristiche del conglomerato bituminoso. Variano in base al dosaggio e all'uso che se ne fa, in base alla tipologia di aggregati e di bitume che vanno ad influenzare.

Fra la moltitudine di agenti modificanti che si possono utilizzare, quelli di maggior rilievo sono:

- Polimeri termoplastici: fluidificano e malleabili se riscaldati. Si distinguono in due classi, plastomeri (EVA *etilene-vinilacetato*) che migliorano le deformazioni permanenti a rottura, generando un incremento della resistenza a rottura. Ed elastomeri (SBS *stirene-butadiene-stirene*) che migliorano il comportamento elastico, determinando un incremento delle deformazioni, delle sollecitazioni a rottura e della resistenza ai carichi ciclici
- Fibre sintetiche o naturali: conferiscono plasticità al mastice bituminoso (bitume + filler). Migliorano la resistenza a trazione del bitume e mitigano il fenomeno del bleeding (un fenomeno di segregazione)
- Attivanti di adesione: favoriscono la coesione bitume – aggregato
- ACF (*Attivanti Chimici Funzionali*): rigenerano il bitume invecchiato del fresato

In particolare, mettendo a confronto la (*Tabella 1.2*) con la (*Tabella 1.3*), si possono notare i miglioramenti del bitume tradizionale in bitume modificato Hard e Soft. In cui per bitume modificato Hard si intende una aggiunta di polimero del 5 ÷ 6 % e modificato Soft un'aggiunta circa del 3 %.

Bitume						
parametro	Normativa	unità di misura	Tal quale 50/70	Tal quale 80/100	Modificato Hard	Modificato Soft
Penetrazione a 25°C	EN1426, CNR24/71	dmm	50-70	70-100	50-70	50/70
Punto di rammollimento	EN1427, CNR35/73	°C	46-54	43-51	≥ 65	≥ 60
Punto di rottura (Fraass)	CNR43 /74	°C	≤ - 8	≤ - 10	≤ - 15	≤ - 12
Solubilità in Tricloroetilene	CNR48/75	%	≥ 99	≥ 99		
Viscosità dinamica a 160°C	PrEN 13072-2	Pa•s	≥ 0,15	≥ 0,10	≥ 0,4	≥ 0,25
Ritorno elastico a 25 °C	EN 13398	%			≥ 75%	≥ 50%
Stabilità allo stoccaggio 3gg a 180°C - Variazione del punto di Rammollimento	EN 13399	°C			≤ 0,5	≤ 0,5
<b>Valori dopo RTFOT</b>	EN12607-1					
Volatilità	CNR54/77	%	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8
Penetrazione residua a 25°C	EN1426, CNR24/71	%	≥ 50	≥ 46	≥ 60	≥ 60
Incremento del punto di Rammollimento	EN1427, CNR35/73	°C	≤ 11	≤ 11	≤ 5	≤ 5

Tabella 1.3

Confronto fra bitume tradizionale e bitume modificato

#### 1.2.4.1 POLIMERI

Prestando una particolare attenzione ai polimeri, essi sono dei materiali organici di sintesi. Sono composti da una molecola di base, monomero, formata tramite legami covalenti. Questa molecola di base è combinata mediante forze intermolecolari (o di Van der Waals) con altre molecole dello stesso genere o diverso (in percentuali relative variabili), formando un omopolimero o copolimero, rispettivamente.

I principali polimeri che vengono utilizzati per la modifica delle miscele bituminose sono i copolimeri termoplastici. Essi hanno la particolarità di essere flessibili e resistenti a temperatura ambiente e passare allo stato liquido a temperature elevate (vedi *Figura 1.3* a destra). Inoltre, se posti a sforzi di trazione si ha un cedimento iniziale, dovuto alla elongazione delle lunghe catene polimeriche intrecciate, ma in seguito si presenta un forte aumento di rigidità (vedi *Figura 1.3* a sinistra). La forte rigidità è causata dalla mancanza di gradi di libertà, dovuta allo srotolamento completo delle catene intrecciate ed inoltre ad una loro parziale cristallizzazione, facilitata dalla maggior vicinanza di esse fra di loro e quindi la formazione di legami (rappresentati tramite dei trattini in *Figura 1.3*).

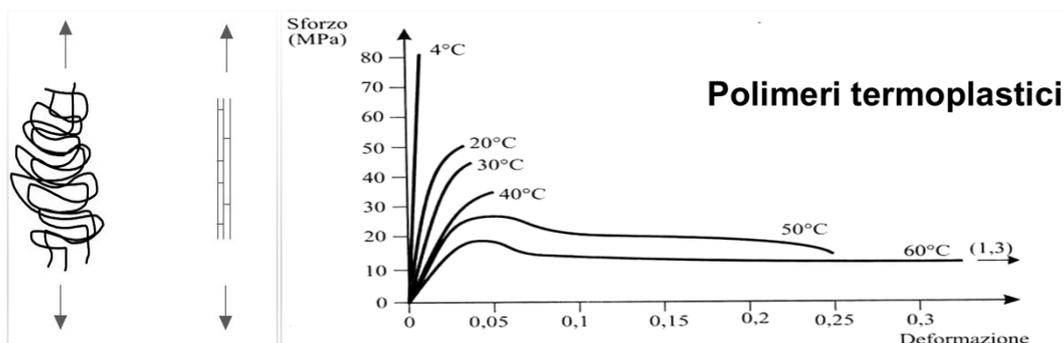


Figura 1.3

Rigidità e resistenza polimeri

#### 1.2.4.2 PmB (METODO WET) E PmA (METODO DRY)

Il Metodo Wet rientra nella categoria dei bitumi modificati PmB (*Polymer Modified Bitumen*). I PmB sono il prodotto dell'unione, di tipo chimico-fisica, fra il bitume tradizionale, ricavato dalla distillazione frazionata del greggio petrolio, e un agente modificante, di solito costituito da un materiale polimerico. È importante sottolineare che l'agente modificante non viene semplicemente addizionato al legante bituminoso, ma vi è la creazione di un composto completamente diverso, con caratteristiche prestazionali maggiori.

Il dosaggio e il tipo di agente modificante variano in funzione al genere di bitume e al tipo di destinazione d'uso che se ne vuol fare.

La produzione avviene in impianti appositamente allestiti, con dosaggi di agenti modificanti che variano da modifiche Hard (solitamente si usa questo tipo), con una aggiunta di agente modificante del 5 ÷ 6 %, a modifiche Soft, del circa del 3 %.

Lo stoccaggio avviene all'interno di serbatoi termici, mantenuti ad una temperatura costante e dotati di sistemi di miscelazione continua, al fine di impedire il fenomeno della segregazione, che si può verificare fra le due fasi di legante e di agente modificante.

Il Metodo Dry rientra nella categoria dei conglomerati bituminosi modificati PmA (*Polymer Modified Asphalt*).

Tra le modifiche del conglomerato bituminoso, rientrano le modifiche tramite scarti di materie plastiche (caso particolare che interessa in questa tesi).

Nell'ultimo periodo si sta cercando sempre di più di ridurre l'accumulo di materie plastiche, fatte specie quelle che non sono possibili riciclare con un impianto di smaltimento tradizionale, le cosiddette plastiche dure, riducendo l'impatto ambientale determinato da esse.

Al fine di ciò si sono sviluppate sempre più nuove tecnologie che permettano il riciclaggio di scarti di materie plastiche. Nell'ambito della pavimentazione stradale, esse sono riciclate attraverso la produzione di un agente modificante del conglomerato bituminoso, costituito fundamentalmente da polimeri.

I metodi di applicazione sono diversi:

- In Metodo Dry, si immettono direttamente nella camera di miscelazione dell'impianto di produzione della miscela
- In Metodo Wet, modificano le caratteristiche reologiche del bitume come accennato in precedenza
- Come sostituzione di frazioni granulometriche all'interno della miscela

Purtroppo, la cattiva affinità chimica, esistente fra la componente plastica e il bitume, ostacola quelle reazioni che si svolgono durante la modifica del bitume per la formazione di un prodotto completamente nuovo con caratteristiche migliori.

Per questa ragione questo particolare tipo di agente modificante non è particolarmente indicato nella modifica del bitume attraverso il metodo wet, ma bensì per la modifica del conglomerato bituminoso mediante l'utilizzo del metodo dry.

Il Metodo Dry infatti permette l'aggiunta dell'agente modificante direttamente all'interno della miscela, nella camera di miscelazione. I polimeri utilizzati con questo tipo di metodo infatti vengono detti "additivi", proprio perché si additivano alla miscela con forze di interazione di tipo fisico – meccanico, differentemente a quanto avviene nel metodo wet, nel quale vi sono interazioni di tipo chimico – fisico.

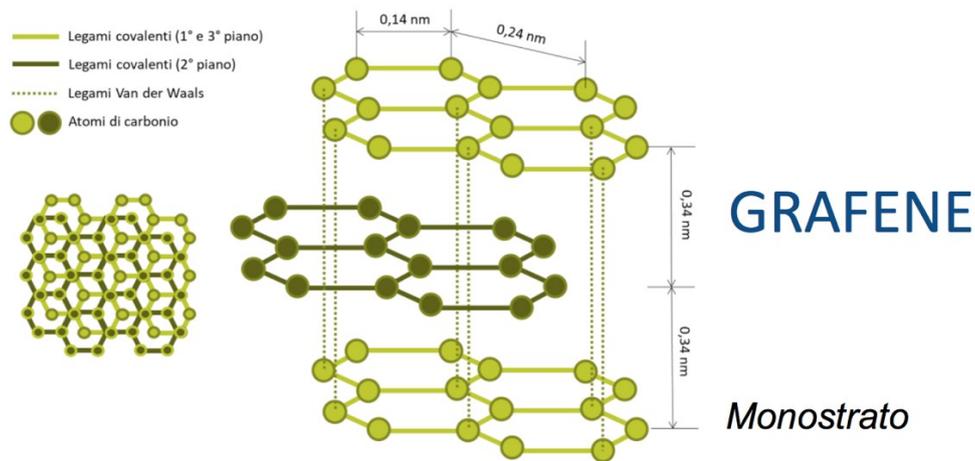
Si distinguono numerosi vantaggi nel miglioramento del conglomerato bituminoso a base di sostanze polimeriche PmA:

- Non sono necessari impianti specializzati nella produzione del PmA, contrariamente a ciò che invece richiede il PmB
- Aumento della viscosità in seguito all'additivazione del polimero
- Incremento delle caratteristiche plastiche, favorendo un aumento delle deformazioni permanenti e della resistenza a rottura e miglioramento della suscettività termica
- Ruolo di additivo addensante, risolvendo il problema della segregazione durante trasporto e posa in opera, problema che caratterizza invece i PmB
- In base alla natura del polimero e al dosaggio che se ne fa, si possono utilizzare all'interno delle miscele ad alta prestazione come strati di base ed usura (solo in strati d'usura per dimensioni grossolane > 10 mm)

#### 1.2.4.3 GRAFENE

Una nuova tecnologia che ha vinto il Premio Nobel per la Fisica nel 2010 (di Kostya Novoselov e Andre Geim, ricercatori dell'Università di Manchester) è il grafene. Questo particolare materiale (*Figura 1.4*) è costituito da un singolo strato di atomi di carbonio, disposti in una rete di esagoni, formando fogli microscopici con lo spessore di un singolo atomo di carbonio e una dimensione laterale di decine di micron.

Questa particolare configurazione geometrica attribuisce a questo materiale proprietà uniche, quali una resistenza elevatissima (circa 200 volte quella dell'acciaio), una flessibilità enorme, capacità di conduzione di calore ed elettricità migliori rispetto al rame, un assorbimento elevatissimo della luce e una superficie specifica molto elevata (circa  $1300 \div 3100 \text{ m}^2/\text{g}$ ).



*Figura 1.4*

*Struttura del grafene*

Nel campo delle pavimentazioni stradali, il grafene è utilizzato per la formazione del compound polimerico a base grafenica per le miscele di tipo PmA (metodo dry). Utilizzando nanotecnologie (materiali con dimensione  $\leq 100$  nm), si ha un supermodificante polimerico contenente nanoplatelets di grafene e una specifica tipologia di plastica di recupero (plastiche dure non riciclabili normalmente), proveniente da rifiuti industriali e da raccolte differenziate destinate al termovalorizzatore. (*Figura 1.5*)

I nanoplatelets di grafene sono formati utilizzando la grafite naturale, attraverso processi produttivi brevettati. La formazione dei nanoplatelets conferisce al compound una elevata qualità e purezza e un raggiungimento delle massime prestazioni, con l'eliminazione di sostanze chimiche estranee.

In conclusione, l'utilizzo di questo composto comporta numerosi vantaggi sia dal punto di vista della produzione e modifica del conglomerato bituminoso sia da un punto di vista ecosostenibile, in particolare:

- Garantisce efficienza e sostenibilità ambientale, producendo strade durature (e quindi con costi di manutenzione minori) e riciclabili più volte
- È altamente prestazionale
- Di qualità costante



*Figura 1.5*  
*Compound al grafene*

## 1.2.5 LA COMPATTAZIONE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

La compattazione della miscela bituminosa in laboratorio può avvenire comunemente attraverso due attrezzature, il compattatore Marshall e la pressa a taglio giratoria.

Il compattatore Marshall [UNI EN 12697-30] è un compattatore ad impatto. È formato da un maglio di peso predefinito che viene fatto cadere da una determinata altezza, per un numero prestabilito di colpi sul campione, sia da un lato che dall'altro (ad un tot di colpi il campione viene girato). Il campione è posto all'interno di uno stampo metallico cilindrico e di dimensioni standard.

È una tecnica ormai datata, che non rappresenta una particolare conformità alla compattazione reale, la quale avviene in sito tramite rulli, essendo come uniche forze sollecitanti le sole forze verticali. In più non vi è un monitoraggio continuo dello stato di compattazione, ma solo lo stato finale.

Il compattatore Marshall viene utilizzato per la determinazione della percentuale di bitume nel conglomerato attraverso il mix design tradizionale (metodo qui non trattato, poiché esula dalle finalità di questa tesi).

Una tecnica che simula maggiormente le condizioni di compattazione in sito è la pressa a taglio giratoria (*Gyratory Shear Compactor*) [UNI EN 12697-31]. Essa infatti si basa sull'applicazione di un carico normale, per mezzo di un pistone a comando idraulico, combinata ad una sollecitazione di taglio, generata da una leggera inclinazione della fustella, dove è contenuto il campione (1.25°) e dalla rotazione, a velocità angolare standard, della fustella stessa intorno all'asse verticale. L'azione combinata di queste sollecitazioni genera una riorganizzazione delle particelle all'interno del campione, mediante traslazione e rotazione reciproche, che simulano gli stessi fenomeni che avvengono durante la compattazione mediante rulli in sito. Inoltre, presenta la possibilità di costruire curve di compattazione (in funzione del numero di rotazioni e grado di addensamento in percentuale), grazie ad una misura in continuo durante il graduale addensamento del campione.

La pressa a taglio giratoria viene utilizzata per la determinazione della percentuale di bitume nel conglomerato attraverso il mix design volumetrico (o SUPERPAVE *SUperior PERforming asphalt PAVements*) (metodo qui non trattato, poiché esula dalle finalità di questa tesi).

## **CAPITOLO 2**

### **INDAGINE SPERIMENTALE**

#### **2.1 INTRODUZIONE**

Mediante analisi in laboratorio si è svolta la caratterizzazione meccanica di diverse miscele in conglomerato bituminoso, al fine di analizzarle e metterle a confronto.

Le miscele sono suddivise in PmA (miscele con modifica dry) con l'utilizzo di compound polimerico e compound polimerico al grafene.

Ed in PmB (miscele con modifica wet) attraverso polimeri SBS Hard (dosaggio del 5 ÷ 6 %).

Di queste miscele, 12 provini sono di conglomerato chiuso (cioè con percentuale di vuoti < 5%), destinate a strati di base e 24 provini sono di conglomerato aperto (cioè con percentuale di vuoti > 15%), destinate a strati d'usura drenante (che per semplicità d'ora in poi chiameremo "strati drenanti").

La caratterizzazione meccanica è stata svolta attraverso prove di laboratorio, che hanno determinato la resistenza a trazione indiretta ed alla frammentazione delle diverse miscele bituminose.

I conglomerati bituminosi sono stati prodotti in impianto e compattati attraverso pressa a taglio giratoria, dalla società Pavimental.

La società Pavimental opera nel settore delle infrastrutture, la quale ha chiesto la partecipazione dell'Università Politecnica delle Marche nella determinazione delle caratteristiche meccaniche in laboratorio dei suddetti provini, finalizzati alla realizzazione di un tronco pilota sull'autostrada A12.

## 2.2 MATERIALI ANALIZZATI

Nella trattazione sperimentale di questa tesi si sono analizzate tre tipologie di miscele bituminose, con rispettive sigle associate (lettera della miscela + numero identificativo del provino) per il riconoscimento durante la sperimentazione in laboratorio.

I provini appartenenti alla categoria PmA sono:

- 4 provini preparati con una miscela bituminosa modificata con compound polimerico PC (*Polymeric Compound*), solo per strati di base
- 16 provini preparati con una miscela bituminosa modificata con compound polimerico al grafene GC (*Graphene Compound*), 4 per strati di base e 12 per strati drenanti

I provini appartenenti alla categoria PmB sono invece:

- 16 provini preparati con una miscela bituminosa contenente bitume SBS Hard H, 4 per strati di base e 12 per strati drenanti

Le percentuali di componenti, da mix design, presenti nelle miscele sono le seguenti:

La percentuale di legante bituminoso totale presente nei conglomerati bituminosi è:

- 4.3% nelle miscele di base
- 5% nelle miscele drenanti

La percentuale di compound è del 5% sul peso del bitume totale sia per le miscele di base che drenanti.

Le miscele sono caratterizzate ulteriormente dalla presenza di fresato RAP, secondo i seguenti quantitativi:

- 30% di fresato nelle miscele di base
- 15% di fresato nelle miscele drenanti

Le prove di caratterizzazione del bitume riportano come valori medi:

- Bitume 50/70 (utilizzato per le miscele PC e GC): penetrazione 52 dmm; punto di rammollimento (Palla e Anello) 48,9 °C
- Bitume modificato (utilizzato per la miscela H): penetrazione 56 dmm; Punto di rammollimento (Palla e Anello) 71,9 °C

Le curve granulometriche delle le miscele dello strato di base e dello strato drenante sono (Figura 2.1), (Figura 2.2):

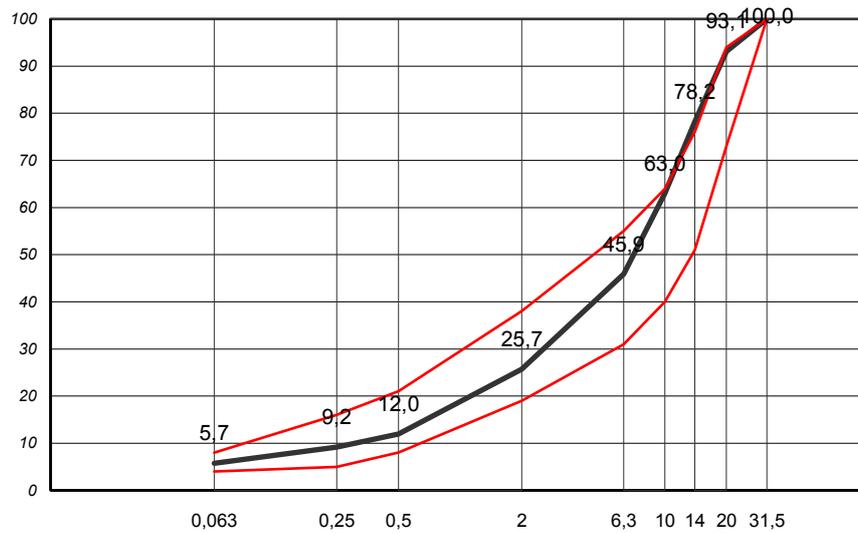


Figura 2.1

Curva granulometrica strato di base

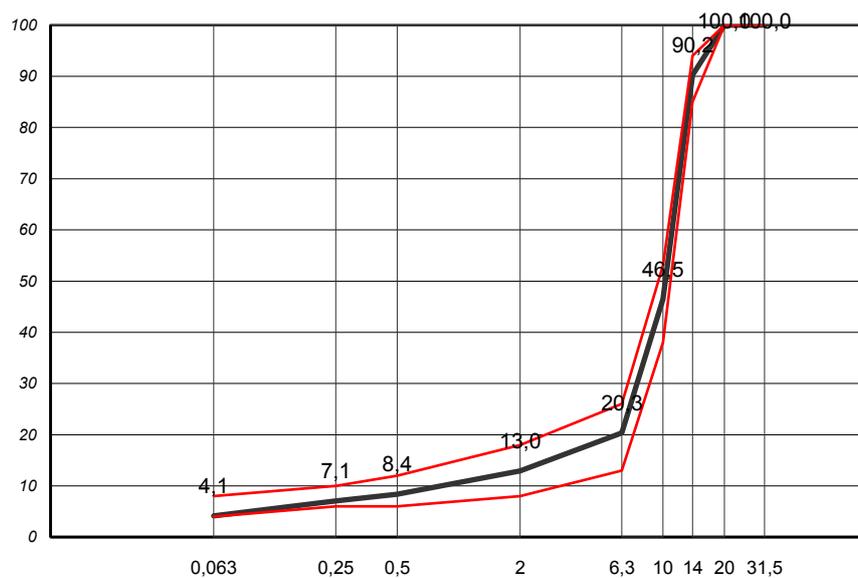
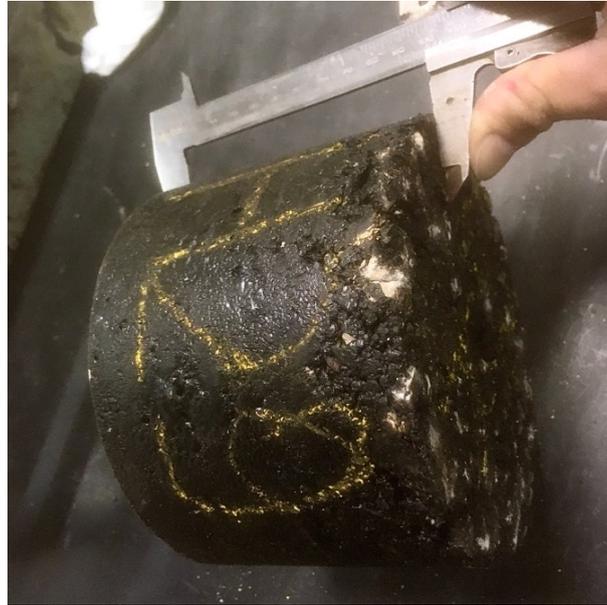


Figura 2.2

Curva granulometrica strato d'usura drenante

Le altezze medie  $H$  [mm] dei provini sono state determinate misurando quattro altezze, poste ad eguali distanze, attraverso l'utilizzo di un calibro e facendone la media (*Figura 2.3*).



*Figura 2.3*  
*Misurazione dell'altezza media del provino*

Analogamente si sono determinati i diametri  $D$  [mm] con la media su due valori misurati.

Pesi, masse volumiche e vuoti percentuali sono stati ricavati come quanto detto nel paragrafo 1.2 .

Di seguito, in (*Tabella 2.1*) e (*Tabella 2.2*), sono riportati i dati di ogni miscela. In verde sono rappresentati i provini sottoposti alla prova di trazione indiretta, mentre in giallo i provini sottoposti alla prova Cantabro.

Dati dei provini appartenenti alla miscela dello strato di base:

PROVINO	Dmedio [mm]	Hmedio [mm]	VOLUME [mm <sup>3</sup> ]	m1 [g]	m2 [g]	$\rho_{dry}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	%Vuotidry [%]
GC29	150,0	60,50	1069123,25	2594,3	1533,4	2,44	2,76
GC30	149,5	61,25	1075173,02	2679,3	1598,7	2,47	1,40
GC31	149,5	62,25	1092726,87	2696,3	1607,8	2,47	1,50
GC32	149,5	61,00	1070784,56	2678,4	1595,8	2,47	1,62
PC19	149,5	61,75	1083949,95	2702,9	1611,1	2,47	1,55
PC20	149,0	61,50	1072352,41	2663,7	1587,4	2,47	1,58
PC21	149,0	60,50	1054915,79	2619,8	1555,8	2,46	2,09
PC22	149,0	58,25	1015683,38	2586,6	1538,7	2,46	1,84
H30	148,5	61,00	1056507,60	2687,9	1607,7	2,48	1,05
H31	149,0	60,25	1050556,63	2659,7	1589,4	2,48	1,18
H32	148,0	61,25	1053705,88	2697,0	1610,5	2,48	1,29
T <sub>w</sub> [°C]	$\rho_w$ [g/cm <sup>3</sup> ]	%aggr [%]	%bit [%]	$\gamma_{aggr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\gamma_{bit}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
20,7	0,99812960	95,97	4,03	2,674	1,02	2,50998	

BASE	
MISCELA	MEDIE %Vuotidry [%]
	per ITS
H	1,17
GC	1,82
PC	1,77

Tabella 2.1

Dati provini strato di base

Dati dei provini appartenenti alla miscela dello strato drenante:

PROVINO	D [mm]	Hmedio [mm]	VOLUME [mm <sup>3</sup> ]	PESO [g]	$\rho_{geom}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	%Vuotigeom [%]
H11	100	77,65	609861,67	1300,9	2,13	15,35
H12	100	79,45	623998,84	1304,1	2,09	17,07
H13	100	80,95	635779,81	1303,8	2,05	18,62
H14	100	77,30	607112,78	1298,9	2,14	15,10
H15	100	79,13	621446,30	1301,0	2,09	16,92
H16	100	81,73	641866,65	1295,5	2,02	19,91
H17	100	64,18	504029,27	1005,1	1,99	20,87
H18	100	63,03	494997,19	1007,2	2,03	19,26
H19	100	63,98	502458,48	1008,8	2,01	20,33
H20	100	64,28	504814,67	1002,3	1,99	21,21
H21	100	64,55	506974,51	1007,6	1,99	21,13
H22	100	63,98	502458,48	1003,6	2,00	20,74
GC11	100	86,25	677062,50	1301,5	1,92	23,72
GC12	100	88,01	690898,13	1303,1	1,89	25,15
GC13	100	88,73	696491,25	1301,3	1,87	25,86
GC14	100	88,05	691192,50	1302,8	1,88	25,20
GC15	100	87,73	688641,25	1301,2	1,89	25,02
GC16	100	86,05	675492,50	1302,4	1,93	23,49
GC17	100	64,45	505932,50	1010,0	2,00	20,78
GC18	100	64,60	507110,00	1008,9	1,99	21,05
GC19	100	64,05	502792,50	1007,5	2,00	20,48
GC20	100	63,08	495138,75	1004,7	2,03	19,48
GC21	100	63,90	501615,00	1007,5	2,01	20,30
GC22	100	64,80	508680,00	1005,6	1,98	21,55
$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]						
2,52						

DRENANTE		
MISCELA	MEDIE %Vuotigeom [%]	
	per ITS	per PL
H	17,16	20,59
GC	24,74	20,61

Tabella 2.2  
Dati provini dello strato drenante

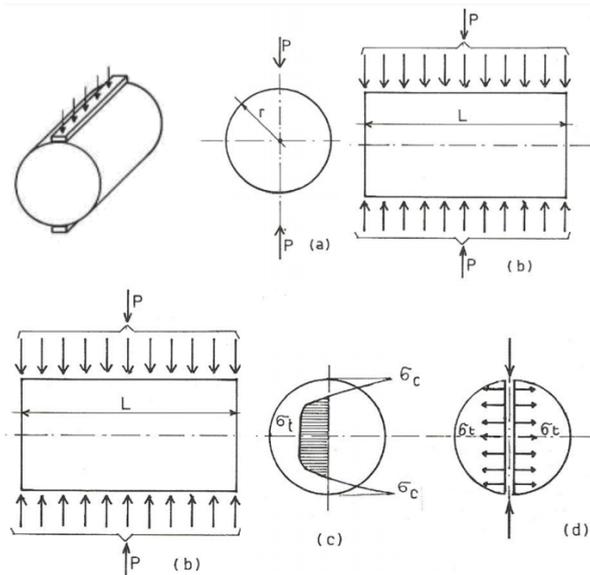
### 2.3 PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA

Sui materiali lapidei non viene eseguita una prova di trazione diretta, ma bensì indiretta, per due motivi principali.

I materiali lapidei hanno un breve comportamento a trazione, quindi attraverso una prova di trazione diretta, i pochi dati che si andrebbero ad analizzare sarebbero inconcludenti per una caratterizzazione meccanica appropriata.

Inoltre, c'è un secondo motivo pratico, la prova di trazione diretta si effettua mediante l'utilizzo di morsetti agganciati agli estremi del provino, i quali vanno ad applicare gli sforzi di trazione. Nei materiali lapidei questi punti di aggancio costituiscono punti di concentrazione degli sforzi non voluti che andrebbero a falsare la prova.

La prova di trazione indiretta (o Brasiliana) (*Figura 2.4*) la si effettua su provini cilindrici, sollecitati a compressione da uno sforzo normale  $P$ , applicato superiormente ed inferiormente in modo diametralmente opposto. La prova sfrutta la teoria dell'elasticità, la quale fornisce l'andamento delle tensioni sulla sezione, in corrispondenza dell'applicazione degli sforzi. Tensioni che sono quasi esclusivamente di trazione  $\sigma_t$  normalmente alla direzione del carico applicato, fatta eccezione, in minima parte, per le zone terminali, dove vi è l'influenza del carico a compressione  $\sigma_c$ .



*Figura 2.4*

*Andamento delle tensioni sulla sezione sollecitata*

### 2.3.1 DETERMINAZIONE ITS

In questo paragrafo sono descritti il procedimento della prova a trazione indiretta svolta in laboratorio e la determinazione della resistenza a trazione indiretta ITS (*Indirect Tensile Strength*), in accordo alla normativa [UNI EN 12697-23].

La resistenza a trazione indiretta (ITS) è la massima tensione di trazione, registrata in corrispondenza di un massimo carico di compressione, applicato diametralmente ad un provino cilindrico, fino al raggiungimento della rottura del provino, in condizioni standard di prova.

Il calcolo dell'ITS di un provino sottoposto alla prova di trazione indiretta avviene secondo l'equazione seguente:

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

In cui:

$ITS$  = Resistenza a trazione indiretta [MPa]

$P$  = Carico di rottura a compressione [N]

$D$  = Diametro del provino [mm]

$H$  = Altezza media provino [mm]

L'ITS della miscela è la media degli ITS ottenuti da almeno tre provini appartenenti al tipo di miscela analizzata.

Rivedendo la (Figura 2.4), la resistenza è il rapporto forza/area. In questo caso, la forza è applicata diametralmente al provino, su due punti e quindi moltiplicata per 2. L'area è la circonferenza moltiplicata per l'altezza, essendo il carico applicato lungo l'altezza del provino.

Il valore di ITS finale della miscela si può considerare accettabile se la differenza degli ITS, calcolati per ogni provino di quella miscela, è minore del 17% dell'ITS medio finale (nel Capitolo 3 dei risultati di laboratorio, la verifica della differenza fra i valori ITS viene svolta tramite la deviazione standard).

Analogamente alla determinazione dell'ITS, si riesce a ricavare il coefficiente di trazione indiretta CTI, secondo la equazione seguente:

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

In cui:

$CTI$  = Coefficiente di trazione indiretta [MPa]

$\delta_c$  = Spostamento verticale [mm]

Mentre il parametro ITS è la resistenza, il parametro CTI è rappresentativo della rigidezza del provino, essendo inversamente proporzionale alla deformazione:

$$CTI = \frac{\pi ITS}{2 \cdot \delta_c/D} \quad \left( = \frac{tensione \text{ [MPa]}}{deformazione \text{ [-]}} = E \right)$$

In cui:

$\delta_c/D$  = Deformazione unitaria a compressione [-]

Il provino cilindrico, compattato tramite pressa giratoria [conforme alla UNI EN 12697-31] a giri imposti (130 per provini drenanti, 200 per provini per strato di base), è stato posto a condizionamento in camera climatica ad una temperatura di 25 °C, per un tempo minimo di 4 ore.

La temperatura del provino ha una grande influenza sulla prova (per le ragioni già nominate nel Capitolo 1, in quanto sia il legante bituminoso sia l'eventuale polimero sono materiali termo-dipendenti). Il range di temperatura indicato per avere fenomeni di rottura a trazione affidabili è di 5 ÷ 25 °C, per temperature maggiori invece si andrebbe a verificare una involuta rottura a compressione.

I provini analizzati sono conformi alla norma, con diametri pari a 100 ± 3 mm, 150 ± 3 mm e dimensione massima di aggregati non superiore a 22 e 40 mm.

La prova è stata eseguita entro 2 minuti dall'estrazione del provino dalla camera climatica.

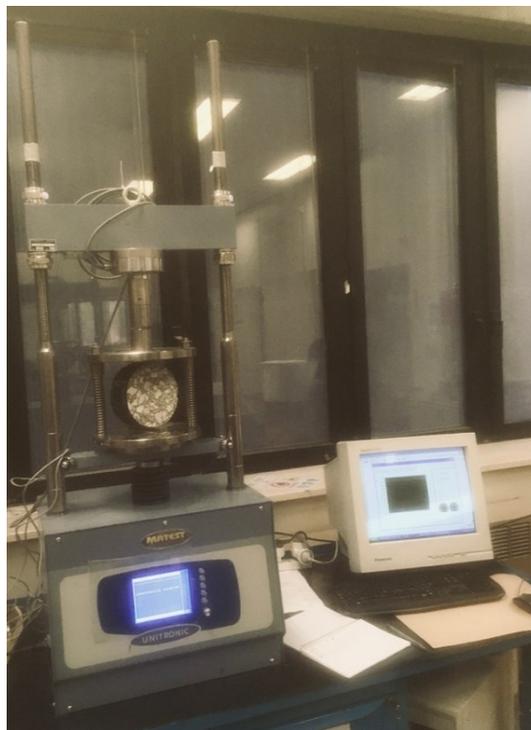
La macchina a compressione utilizzata è una pressa universale (*Figura 2.5*) con una capacità di carico di 50 kN e una velocità a controllo di deformazione pari a 50,8 mm/min (50 ± 2 secondo norma).

È importante notare che nella norma viene precisato che se sono presenti provini con grossi diametri di 150 o 160 mm, i 50 kN di carico potrebbero non bastare, in

tal caso si può provvedere con l'utilizzo di macchine a compressione con capacità di carico maggiori. Nel nostro caso, durante l'esecuzione della prova per il provino H29, con diametro di 150 mm, si è verificato infatti che il carico non è bastato per raggiungere il carico massimo a rottura. Non avendo a disposizione un'ulteriore macchina con capacità di carico maggiori, allora si è provveduto diminuendo l'altezza media di tutti i provini, riferiti allo strato di base, caratterizzati da un diametro di 150 mm, diminuendo così il carico necessario a rottura, essendo  $P$  direttamente proporzionale ad  $H$  come si può notare dalla formula inversa dell'ITS:

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

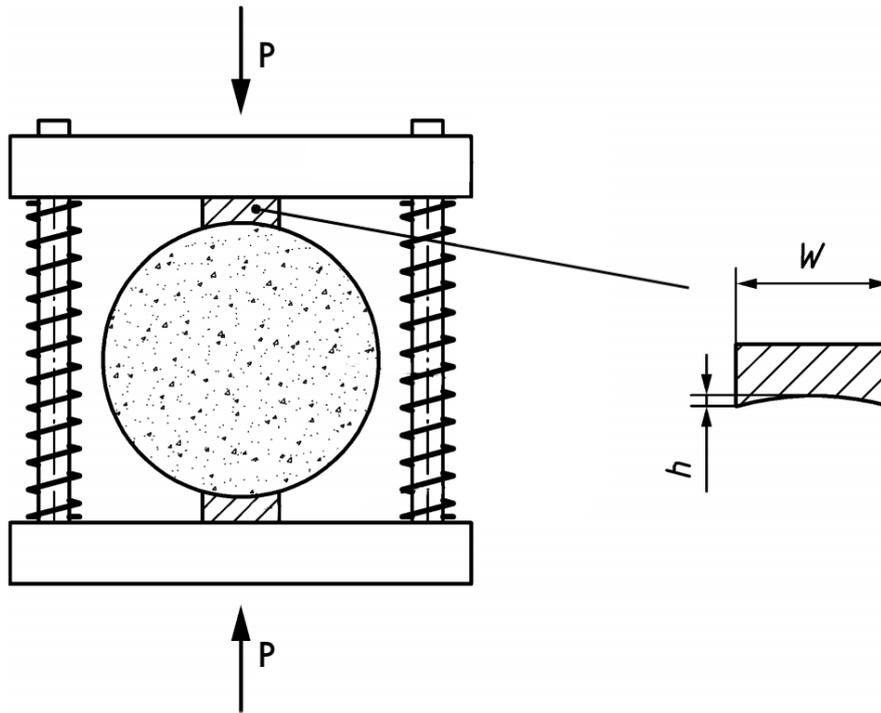
La macchina a compressione è controllata da un computer (*Figura 2.5*), il quale utilizza un software di nome UTM II [in accordo con la norma UNI EN 12697-23]. Riportando la geometria (l'altezza media  $H$  ed il diametro  $D$ ) ed il peso del provino [g], il software permette di tarare e azionare la macchina, registrando i dati in continuo durante lo svolgimento della prova.



*Figura 2.5*

*Macchinario e computer per le prove ITS*

Si estrae il provino dalla camera climatica e lo si posiziona fra due listelli (*Figura 2.6*), avvitati alla mezzeria delle due piastre di carico, con valori di altezze e curvatura (curvatura sulla quale si poggia il provino cilindrico) secondo le specifiche dimensioni geometriche del provino (*Tabella 2.3*).



*Figura 2.6*

*Piastre di carico e listello superiore ingrandito a destra*

	<b>Dimensions</b> mm				
Specimen diameter (mm)	80 ± 2	100 ± 3	120 ± 3	150 ± 3	160 ± 3
Loading strip width, W (mm)	10,2 ± 0,1	12,7 ± 0,2	15,2 ± 0,2	19,1 ± 0,2	20,0 ± 0,2
Maximum height difference at the curved side of the loading strip, h (mm)	0,33	0,40	0,48	0,61	0,63

*Tabella 2.3*

*Dimensioni geometriche dei listelli al variare del diametro del provino*

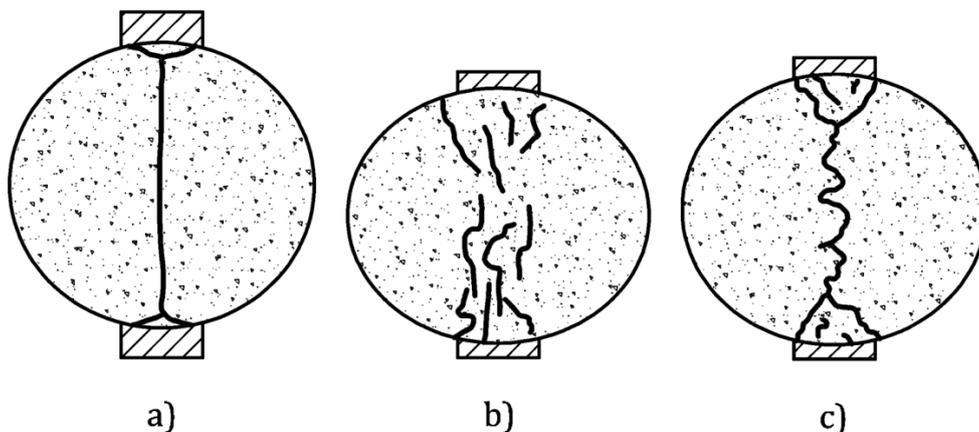
Dunque, si appoggia il provino nel listello inferiore, più centralmente possibile rispetto al listello, cosicché si riesca ad applicare diametralmente il carico, senza creare eccentricità che andrebbero a falsare la prova. Si deve prestare pure

attenzione che le superfici dei listelli e la superficie del provino (a contatto con la superficie dei listelli), siano prive di corpi estranei che potrebbero, durante la prova di carico, creare un involuto punto di concentrazione degli sforzi. Appoggiato il provino, si abbassa la piastra superiore, facendo aderire il listello superiore, e verificando che il provino sia ben fermo.

A questo punto, tramite il computer, si tara la macchina e la si aziona. L'apparato inferiore della macchina (composto dalle due piastre appoggiate diametralmente al provino come in *Figura 2.6*) si sposterà, tramite un pistone, con una velocità di corsa di 50,8 mm/min, verticalmente verso l'apparato superiore, il quale svolge il ruolo di contrasto (si deve prestare attenzione che la corsa del pistone non superi i binari della macchina, rappresentati da due linee, una inferiore e l'altra superiore, incise sulle guide verticali dove avviene la corsa). Raggiunto l'apparato di contrasto, si avrà l'inizio della prova di carico sul provino, fino alla registrazione di un picco ed infine, la rottura del provino con conseguente fine corsa del pistone.

Le possibili tipologie di rottura che si potrebbero osservare sono (*Figura 2.7*):

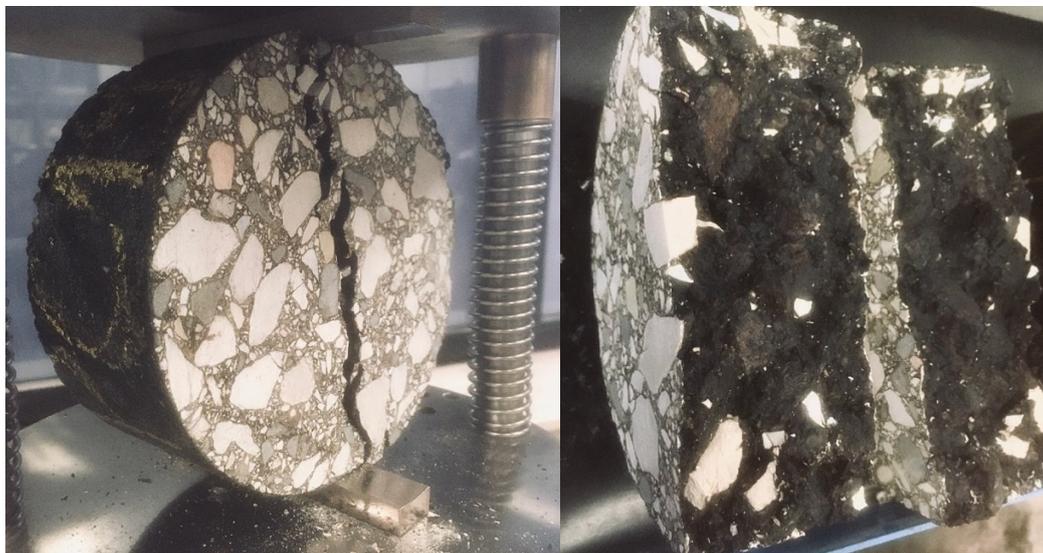
- a) Rottura diametrale evidente
- b) Rottura non visibile chiaramente
- c) Una combinazione delle prime due con una rottura diametrale ridotta e maggiore nella zona di sollecitazione a compressione.



*Figura 2.7*

*Tipologie di rottura visibili*

Un esempio è mostrato in (Figura 2.8), in cui a sinistra si ha una rottura di tipo a) ed a destra l'analisi visiva della superficie interna al piano di rottura:



*Figura 2.8*  
*Rottura provino PC19*

Ultimata la prova si possono registrare i valori a rottura di deformazione unitaria a compressione  $\delta_c/D$  [-], carico di rottura a compressione  $P$  [kN] e resistenza a trazione indiretta ITS [kN/mm<sup>2</sup>], quest'ultimo da moltiplicare per 1000 per ottenere il valore in [MPa], secondo la formula ITS già descritta (Figura 2.9).

Inoltre, i dati registrati in continuo vengono espressi graficamente, la cui coordinata x indica la corsa effettuata e la coordinata y il carico applicato (Figura 2.10). Dati che sono ulteriormente archiviati, in forma tabellare, in un programma allegato di nome Microsoft-Access. Per ricostruire il grafico Carico – Spostamento, attraverso i valori tabellati, si escludono tutti valori x e y antecedenti l'ultimo valore y uguale a zero (questi primi valori rappresentano i valori registrati durante la corsa iniziale di avvicinamento all'apparato di contrasto). Dunque, partendo da quest'ultimo valore di y uguale a zero e il rispettivo x, si costruisce la curva Carico – Spostamento considerando tutti i rimanenti valori x e y.

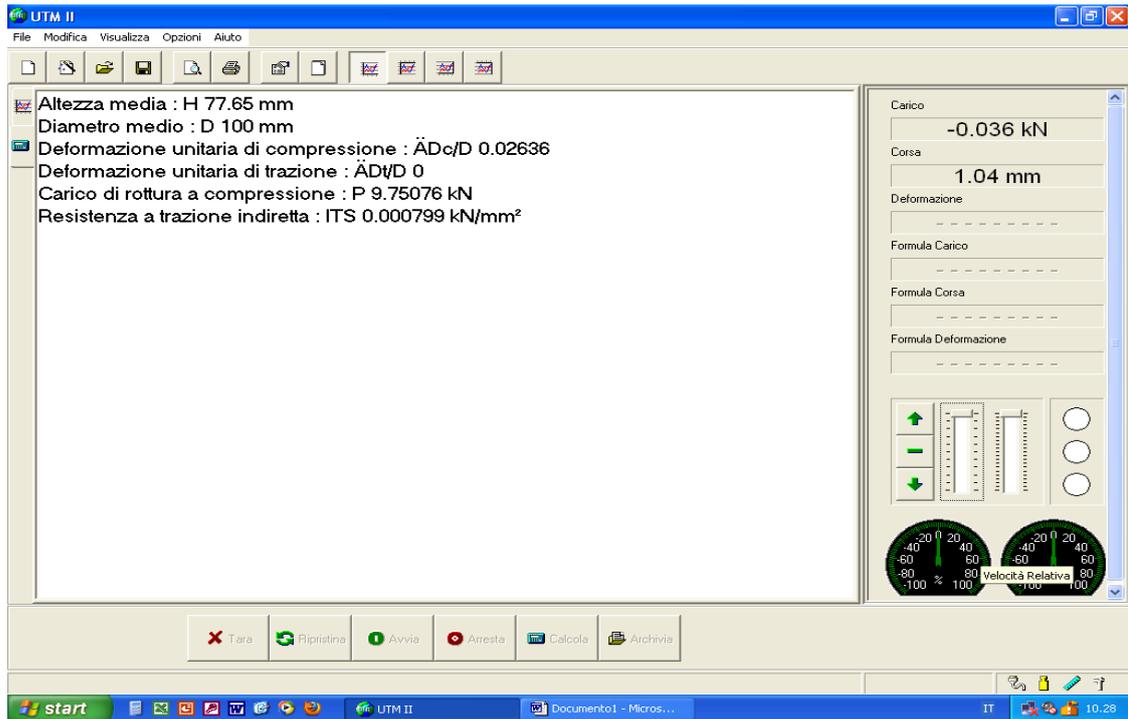


Figura 2.9  
Valori a rottura registrati dal computer

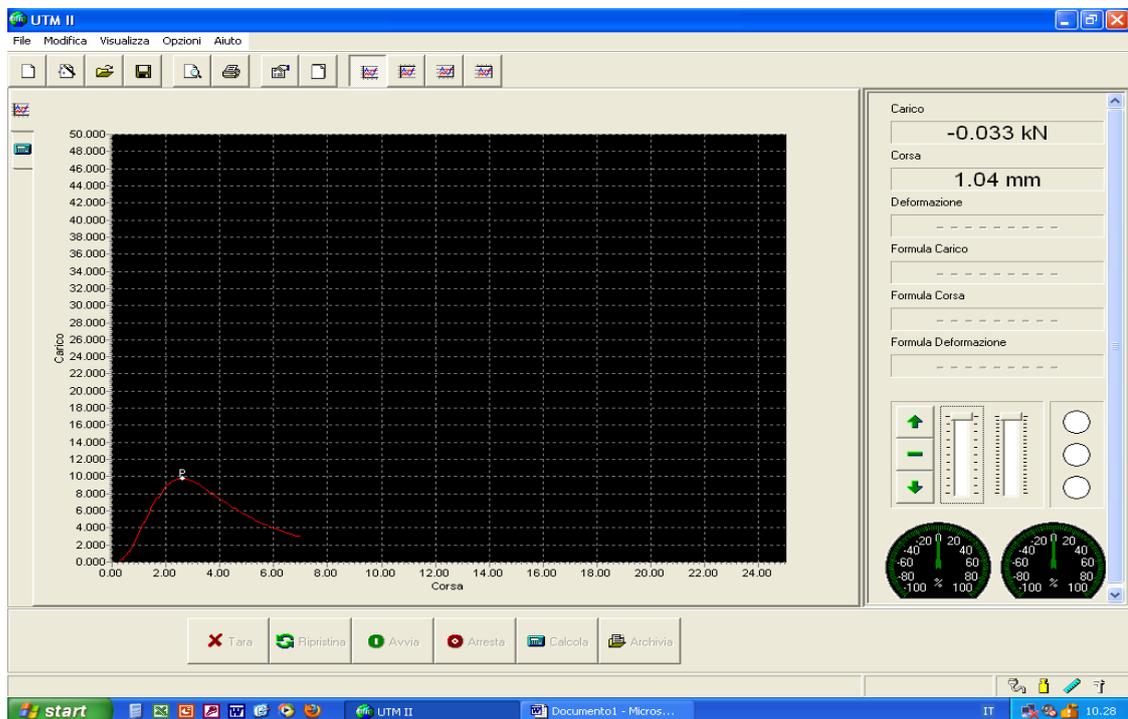


Figura 2.10  
Curva Carico – Spostamento registrata durante la prova

## 2.4 PROVA CANTABRO

In un conglomerato bituminoso la resistenza a rottura dipende anche dall'adesione della componente lapidea con il legante bituminoso.

Per questo motivo, nel tentativo di ricavare la qualità meccanica degli aggregati all'interno del conglomerato bituminoso, non si effettua una prova di resistenza a compressione direttamente sull'aggregato, ma bensì si ricava la resistenza alla frammentazione PL (*Particle Loss*) del conglomerato bituminoso, sottoposto ad abrasione e urti.

La resistenza alla frammentazione di un conglomerato bituminoso si ricava attraverso la prova Cantabro, utilizzando la macchina Los Angeles [conforme alla UNI EN 1097-2].

La macchina Los Angeles (*Figura 2.11*), nelle condizioni di prova Cantabro<sup>2</sup>, è composta da un cilindro cavo in acciaio con asse orizzontale, chiamato tamburo, al cui interno sono presenti dei setti disposti lungo tutta la lunghezza del cilindro, ad una distanza standard fra di loro.

Il provino viene appoggiato all'interno del tamburo e, dopo avere chiuso il tamburo, si fa partire la prova, azionando la macchina che porterà in rotazione il tamburo, il quale solleverà il provino, tramite i setti longitudinali, per farlo così cadere all'interno del volume del tamburo stesso. Si crea così una reazione a catena con gli altri setti, che porterà il provino alla frammentazione, causata dall'urto combinato fra la parete e i setti della macchina, nonché dagli stessi frammenti del conglomerato.

---

<sup>2</sup> La macchina Los Angeles è pure dotata di sfere metalliche utilizzate per la prova Los Angeles. Un altro tipo di prova che prevede l'aggiunta di queste sfere metalliche all'interno del tamburo, determinando la resistenza alla frammentazione degli aggregati lapidei. Nel caso della prova Cantabro queste sfere di metallo sono da escludere.



Figura 2.11  
Tamburo Los Angeles

#### 2.4.1 DETERMINAZIONE PL

Di seguito vengono descritti il procedimento della prova Cantabro e la determinazione del parametro PL (*Particle Loss*), in accordo alla normativa [UNI EN 12697-17].

La resistenza alla frammentazione (PL) indica la perdita percentuale di massa di una miscela in conglomerato bituminoso drenante, quindi un valore di PL alto vorrà significare una resistenza alla frammentazione bassa.

L'indice PL si calcola attraverso la formula seguente:

$$PL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \cdot 100$$

In cui:

$PL$  = Particle Loss [%]

$W_1$  = Massa iniziale provino [g]

$W_2$  = Massa finale provino [g]

(con  $W_2 < W_1$  per la perdita di massa)

Il PL della miscela è la media dei PL ottenuti da almeno cinque provini appartenenti al tipo di miscela analizzata.

Il provino, di forma cilindrica, compattato tramite pressa giratoria [conforme alla UNI EN 12697-31] a giri imposti (40), è stato posto a condizionamento in camera climatica ad una temperatura di 25 °C, per un tempo minimo di 4 ore.

La temperatura del provino ha una grande influenza sulla prova (per le ragioni già nominate nel Capitolo 1, in quanto sia il legante bituminoso sia l'eventuale polimero sono materiali termo-dipendenti). Il range di temperatura indicato è di 15 ÷ 25 °C, per temperature maggiori invece di 35 °C si andrebbe a falsare la prova.

Estratto il provino dalla camera climatica, lo si pesa determinando  $W_1$  [g] (Figura 2.12)



*Figura 2.12*

*Misura  $W_1$  del provino H20*

In seguito, il provino viene appoggiato all'interno della macchina Los Angeles, nelle condizioni di prova Cantabro. Si aziona la macchina e il tamburo inizia a girare con una velocità di 3,1 ÷ 3,5 rad/s, cioè 30 ÷ 33 giri/min, per un totale di 300 giri (circa 10 min).

A fine prova, si estrae il provino dal tamburo, rimuovendo dal provino tutte le particelle che si sono chiaramente distaccate da esso, ma ancora trattenute per inerzia. Si pesa nuovamente il provino ricavando così il peso finale post frammentazione  $W_2$  (Figura 2.13). A questo punto si è in grado di ricavare l'indice PL del provino.



*Figura 2.13*

Misura  $W_2$  del provino H20

Prima di ripetere la prova, per almeno altri quattro provini (per ricavare il PL medio che corrisponde al PL della miscela), al fine di non falsare la prova successiva, si devono rimuovere tutte le particelle residue dal tamburo, facendo depositare queste in una teglia, posta al di sotto del tamburo (Figura 2.11).

## CAPITOLO 3

### ANALISI DEI RISULTATI

#### 3.1 PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA

Attraverso la prova a trazione indiretta si è riusciti a ricavare la resistenza a trazione dei provini in conglomerato bituminoso, espressa attraverso il calcolo dell'indice ITS (*Indirect Tensile Strength*). Un indice ITS grande sta ad indicare una grande resistenza meccanica a trazione del conglomerato bituminoso.

Oltre all'indice ITS sono stati ricavati pure il coefficiente a trazione indiretta CTI e le rispettive deviazioni standard dei due tipi di risultato, riportate pure nei diagrammi dei valori medi.

Importante concetto da sottolineare è l'influenza sostanziale che ha la percentuale dei vuoti sul valore di resistenza a trazione indiretta ITS.

Una percentuale di vuoti maggiore, di solito, influenza negativamente la resistenza meccanica delle miscele. In quanto, maggiore è la porosità presente lungo la sezione di sollecitazione del provino, più piccola è l'area effettiva bitume – aggregato sollecitata, quindi minore è la possibilità di resistere alla sollecitazione subita.

Concetto che si dovrà tenere a mente nel corso dell'analisi dei risultati.

La prova ITS è stata svolta su un totale di 24 provini, 12 per strato di base (4 provini per ciascuna miscela studiata) e 12 per strato drenante (6 provini per ciascuna miscela studiata).

Di seguito verranno riportati in forma tabellare i risultati delle prove ed informazioni aggiuntive sul tipo di provino, utili per il confronto dei risultati.

In più, rispettivamente per ogni miscela studiata, si sono riportati i grafici che riportano le curve Carico – Spostamento ricavate tramite i valori x e y tabellati,

forniti dal programma UTM II (vedi paragrafo 2.3.1) ed i diagrammi, in cui retta tratteggiata rappresenta il valore medio di ITS.

Per ciascuno strato studiato si rappresenterà, come conclusione ed analisi dei risultati, una tabella ed un diagramma contenente i risultati finali delle miscele rispettive di quello strato.

### 3.1.1 MISCELE STRATO DI BASE

Per lo studio della miscela di base si sono testati 12 provini:

- 4 provini per la miscela modificata con compound polimerico (PC)
- 4 provini per la miscela modificata con compound al grafene (GC)
- 4 provini per la miscela con bitume modificato SBS Hard (H). Il primo provino testato H29 (come già accennato nel paragrafo 2.3.1) ha fornito risultati inconcludenti, poiché il carico massimo applicabile dal macchinario non è risultato sufficiente per raggiungere la resistenza a rottura del provino. Un risultato sicuramente dato dalla grossa geometria del provino (caratterizzato inizialmente da un'altezza media di 104,2 mm), come anche la norma [UNI EN 12697-23] esplicita per provini di grosso diametro.

Si è allora provveduto a ridurre, attraverso dei tagli, le altezze di tutti gli 11 rimanenti provini dello strato di base, caratterizzati dalla medesima geometria. Infatti, come si può notare dalla formula dell'ITS, il carico normale è direttamente proporzionale all'altezza del provino. Se l'altezza del provino diminuisce, diminuisce pure il carico necessario a romperlo.

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

Come risultato di ciò, per la miscela di tipo PmB con bitume modificato SBS Hard si è ricavato l'indice ITS come media di 3 provini dei 4 provini disponibili, dai quali si è potuti ricavare comunque l'indice ITS della miscela, ancora valido secondo la norma [UNI EN 12697-23], la quale

impone un minimo di 3 provini per la determinazione dell'ITS medio della miscela studiata.

I risultati della miscela PC sono i seguenti:

MISCELA PC (POLYMERIC COMPOUND)					
TEST DRY 26/10/2020					
	Unità di Misura	Provino PC19	Provino PC20	Provino PC21	Provino PC22
Hmedia	[mm]	61,75	61,50	60,50	58,25
D	[mm]	150	150	150	150
%Vuotidry	[%]	1,55	1,58	2,09	1,84
$\delta c/D$	[-]	-	0,017423	0,017311	0,018972
P	[kN]	33,31835724	31,761826	30,284767	29,628578
ITS	[MPa]	2,290	2,192	2,125	2,159
CTI	[MPa]	-	197,613291	192,8220319	178,755496
ITSmedio	[MPa]	2,191			
CTImedio	[MPa]	142,2977047			
ITSdevst	[-]	0,071135788			
CTIdevst	[-]	9,801700779			

Tabella 3.1

Risultati miscela PC

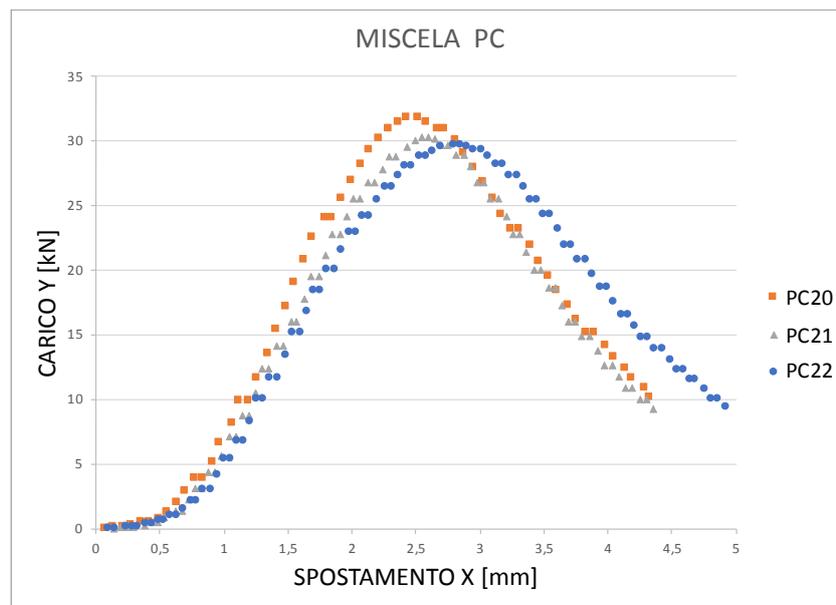
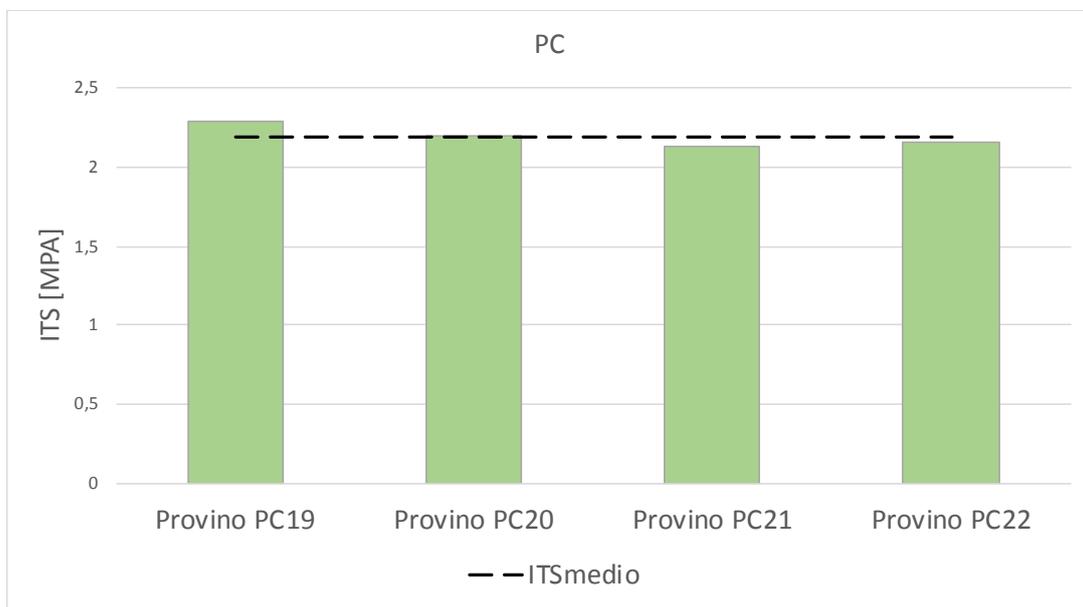


Figura 3.1

Curve Carico – Spostamento provini PC

Le curve Carico – Spostamento rappresentate sono tre e non quattro (come si può notare dalla *Figura 3.1*). Questo è dovuto alla mancanza di dati del provino PC19, per il quale si è riusciti a valutare solo il valore di ITS. Questa mancanza di dati (sia in *Figura 3.1* che in *Tabella 3.1*) è dovuta ad un problema puramente tecnico della prova; alla fine della prova di trazione indiretta il provino rotto si è spezzato immediatamente a metà, cadendo dalle piastre, ed ha portato così ad un reset del programma di misurazione del computer. Si è riusciti a registrare in tempo solo il valore di ITS raggiunto, senza avere la possibilità di archiviare i valori mancanti.



*Figura 3.2*

*Diagramma degli ITS dei provini PC*

I risultati della miscela GC sono i seguenti:

MISCELA GC (GRAPHENE COMPOUND)					
TEST DRY 26/10/2020					
	Unità di Misura	Provino GC29	Provino GC30	Provino GC31	Provino GC32
Hmedia	[mm]	60,50	61,25	62,25	61,00
D	[mm]	150	150	150	150
%Vuotidry	[%]	2,76	1,40	1,50	1,62
$\delta c/D$	[-]	0,018834	0,015294	0,016679	0,015648
P	[kN]	29,126848	30,678513	33,108026	32,158723
ITS	[MPa]	2,043	2,126	2,226	2,237
CTI	[MPa]	170,3906178	218,3544521	209,6121701	224,5572203
ITSmedio	[MPa]	2,158			
CTImedio	[MPa]	205,7286151			
ITSdevst	[-]	0,091420763			
CTIdevst	[-]	24,34326865			

Tabella 3.2

Risultati miscela GC

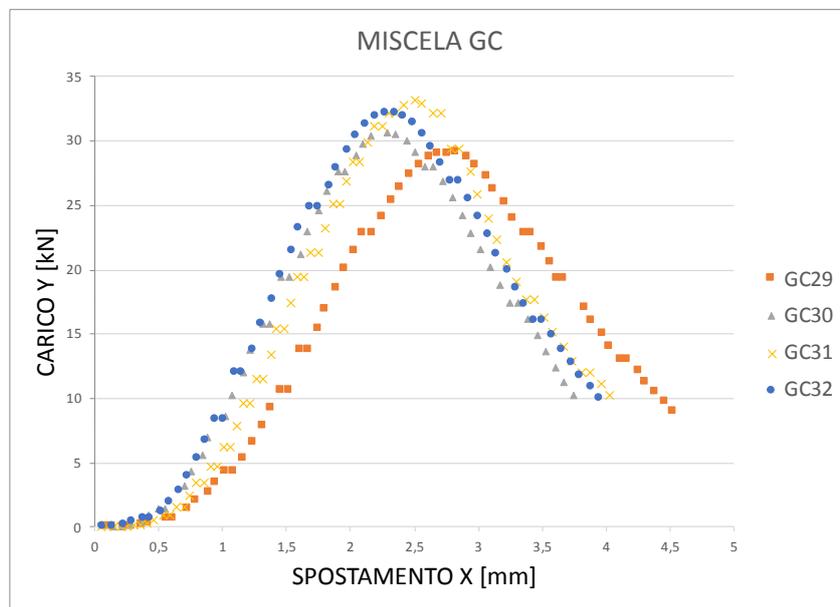


Figura 3.3

Curva Carico – Spostamento provini GC

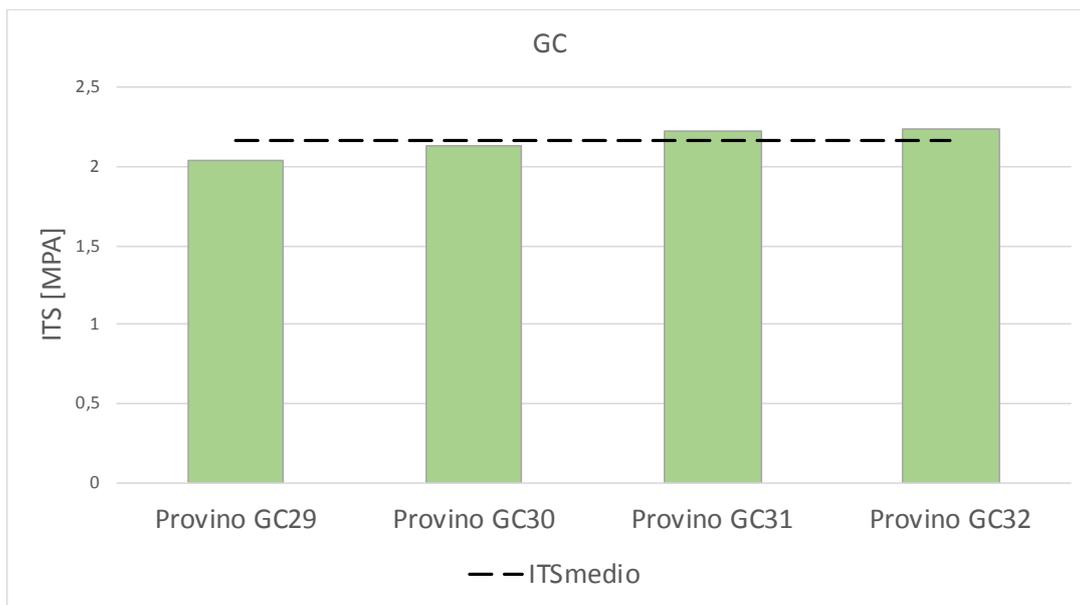


Figura 3.4

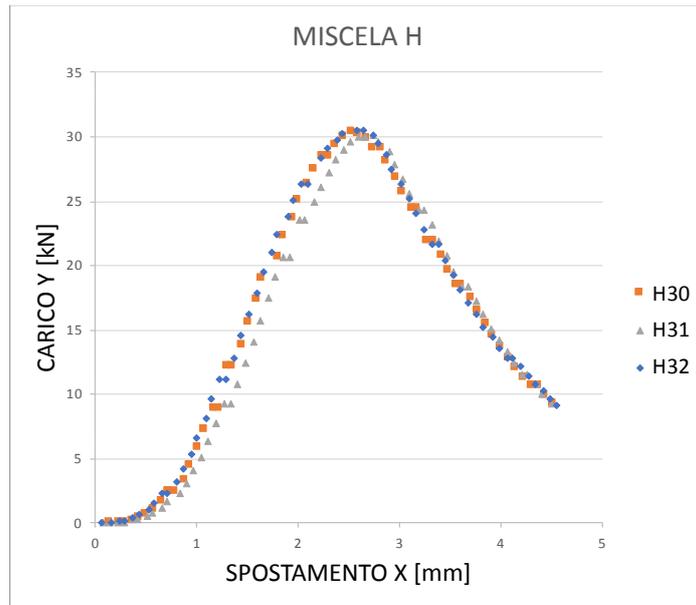
Diagramma degli ITS dei provini GC

I risultati della miscela H sono i seguenti:

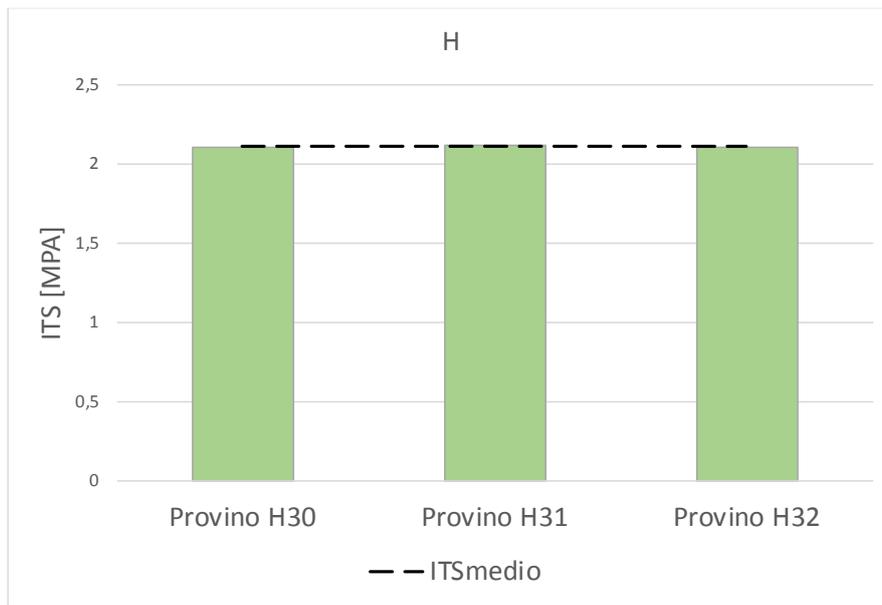
MISCELA H (HARD BITUMINOUS MIXTURES MODIFIED)				
TEST DRY 26/10/2020				
	Unità di Misura	Provino H30	Provino H31	Provino H32
Hmedia	[mm]	61,00	60,25	61,25
D	[mm]	150	150	150
%Vuotidry	[%]	1,05	1,18	1,29
$\delta_c/D$	[-]	0,016884	0,018321	0,017602
P	[kN]	30,338648	30,073055	30,451548
ITS	[MPa]	2,111	2,118	2,110
CTI	[MPa]	196,3960582	181,5919775	188,2956624
ITSmedio	[MPa]	2,113		
CTImedio	[MPa]	188,7612327		
ITSdevst	[-]	0,004358899		
CTIdevst	[-]	7,413013397		

Tabella 3.3

Risultati miscela H



*Figura 3.5*  
*Curve Carico – Spostamento provini H*



*Figura 3.6*  
*Diagramma degli ITS dei provini H*

I risultati finali delle miscele dello strato di base sono qui riassunti:

BASE					
MISCELA	ITSmedio [MPa]	CTImedio [MPa]	ITSdevst [-]	CTIdevst [-]	%Vuotidrymedio [%]
H	2,113	188,7612327	0,004358899	7,413013397	1,17
GC	2,158	205,7286151	0,091420763	24,34326865	1,82
PC	2,191	142,2977047	0,071135788	9,801700779	1,77

*Tabella 3.4*

*Risultati miscele strato di base*



*Figura 3.7*

*Diagramma degli ITS medi delle miscele dello strato di base e rispettive deviazioni standard*

Ricordando l'influenza negativa che la percentuale dei vuoti ha sul valore di ITS (vedi paragrafo 3.1), in questo caso le miscele presentano una percentuale di vuoti molto bassa (conglomerati bituminosi chiusi hanno un valore tipico di %Vuoti < 5 %, in questo caso sono < 2 %). Questo aspetto, unitamente al fatto che tutte le miscele sono modificate (con metodo wet o metodo dry), ha portato a valori elevati di ITS per tutte le miscele, superiori a 2 MPa.

I valori di ITS riferiti ai singoli provini di una medesima miscela non cambiano considerevolmente, specialmente per quanto riguarda la miscela H, la quale presenta una deviazione standard (devst) minore rispetto alle altre di un ordine di grandezza.

La differenza dei valori di ITS medi tra le tre miscele non è sostanziale. Tuttavia, va evidenziato che le miscele con i compound (GC e PC) presentano un contenuto di vuoti medio analogo, mentre la miscela H è caratterizzata da un contenuto di vuoti medio inferiore. Pertanto, a parità di vuoti, la miscela H potrebbe essere caratterizzata da valori di ITS inferiori rispetto alle miscele con i compound.

I valori di CTI ottenuti indicano invece che la miscela con compound al grafene potrebbe essere caratterizzata da una rigidità maggiore rispetto alla miscela con bitume SBS ed alla miscela con compound polimerico.

In sintesi, si presentano valori di resistenza a trazione indiretta equivalenti per quanto riguarda le miscele con compound e, a parità di vuoti, è lecito aspettarsi resistenze minori per la miscela con bitume SBS.

### 3.1.2 MISCELE STRATO DRENANTE

Per lo studio delle miscele per strato drenante sono stati testati 12 provini:

- 6 provini della miscela modificata con compound polimerico al grafene (GC)
- 6 provini della miscela con bitume modificato SBS Hard (H)

I risultati della miscela GC sono i seguenti:

MISCELA GC (GRAPHENE COMPOUND)							
TEST DRY 27/10/2020							
	Unità di Misura	Provino GC11	Provino GC12	Provino GC13	Provino GC14	Provino GC15	Provino GC16
Hmedia	[mm]	86,25	88,01	88,73	88,05	87,73	86,05
D	[mm]	100	100	100	100	100	100
$\delta_c/D$	[-]	0,021794	0,028897	0,021641	0,022255	0,020498	0,023917
%Vuotigeom	[%]	23,72	25,16	25,86	25,20	25,02	23,49
P	[kN]	7,316109	7,075988	6,343465	6,975684	7,890578	7,331307
ITS	[MPa]	0,540	0,512	0,455	0,504	0,573	0,542
CTI	[MPa]	38,9203458	27,83152989	33,02584579	35,57319024	43,90995684	35,59692307
ITSmedio	[MPa]	0,521					
CTImedio	[MPa]	35,80963194					
ITSdevst	[-]	0,040575855					
CTIdevst	[-]	5,418349039					

Tabella 3.5

Risultati miscela GC

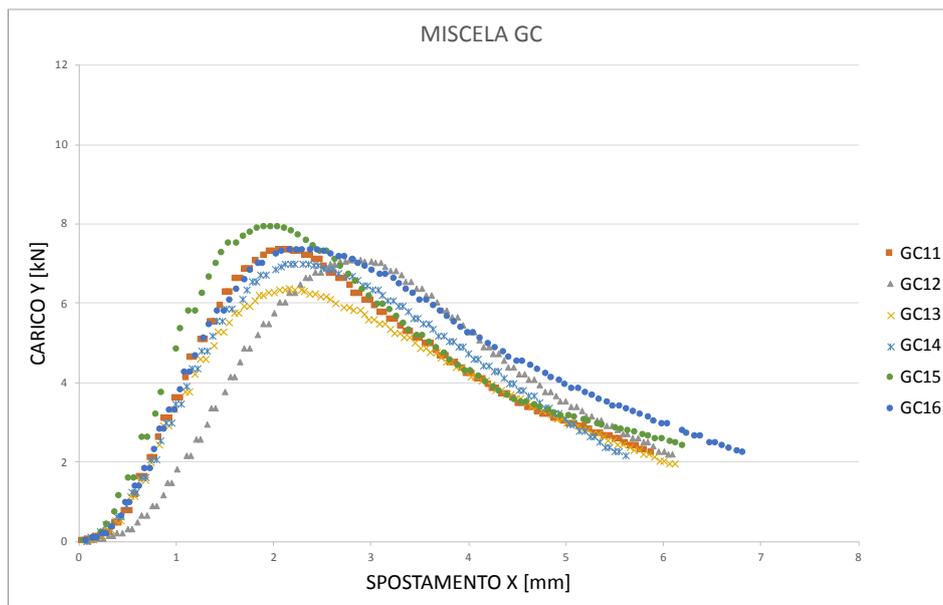
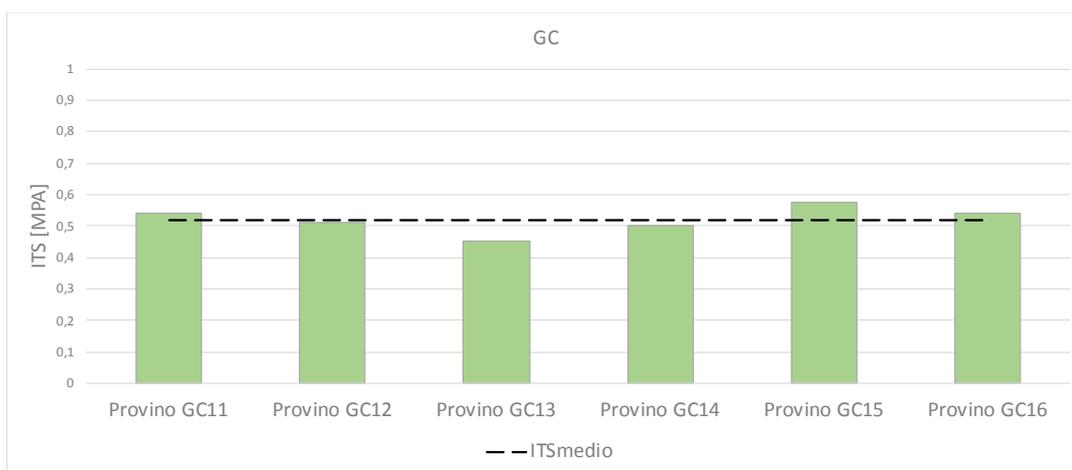


Figura 3.8

Curve Carico – Spostamento provini GC



*Figura 3.9*  
*Diagramma degli ITS dei provini GC*

I risultati della miscela H sono i seguenti:

MISCELA H (HARD BITUMINOUS MIXTURES MODIFIED)							
TEST DRY 27/10/2020							
	Unità di Misura	Provino H11	Provino H12	Provino H13	Provino H14	Provino H15	Provino H16
Hmedia	[mm]	77,65	79,45	80,95	77,30	79,13	81,73
D	[mm]	100	100	100	100	100	100
$\delta_c/D$	[-]	0,02636	0,020701	0,025684	0,026301	0,0246	0,022144
%Vuotigeom	[%]	15,31	17,03	18,58	15,06	16,88	19,87
P	[kN]	9,75076	10,299163	10,058759	10,568887	10,908138	9,699088
ITS	[MPa]	0,799	0,825	0,791	0,870	0,878	0,756
CTI	[MPa]	47,61252903	62,60117722	48,37641701	51,95972793	56,06338109	53,62725899
ITSmedio	[MPa]	0,820					
CTImedio	[MPa]	53,37341521					
ITSdevst	[-]	0,047469639					
CTIdevst	[-]	5,52464039					

*Tabella 3.6*  
*Risultati miscela H*

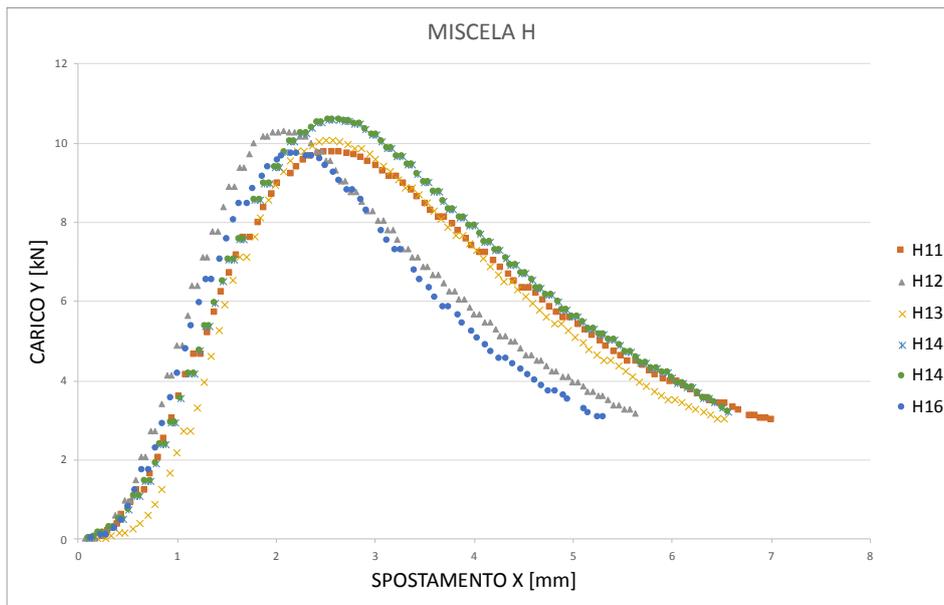


Figura 3.10  
Curve Carico – Spostamento provini H

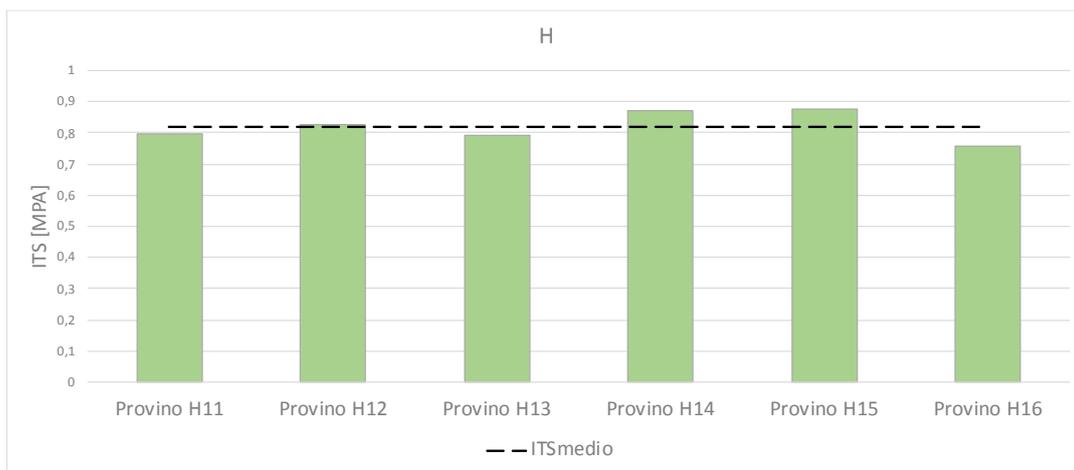


Figura 3.11  
Diagramma degli ITS dei provini H

I risultati finali delle miscele per strato drenante sono qui riassunti:

DRENANTE					
MISCELA	ITSmedio [MPa]	CTImedio [MPa]	ITSdevst [-]	CTIdevst [-]	%Vuotigeom medio [%]
H	0,820	53,37341521	0,047469639	5,52464039	17,12
GC	0,521	35,80963194	0,040575855	5,418349039	24,74

*Tabella 3.7*

*Risultati miscele strato drenante*



*Figura 3.12*

*Diagramma degli ITS medi delle miscele dello strato drenante con rispettive deviazioni standard*

Come si può immediatamente notare, le miscele drenanti presentano dei valori di ITS decisamente minori rispetto ai valori ottenuti per le miscele di base. Questa forte differenza è principalmente dovuta alla sostanziale differenza nel contenuto di vuoti tra i provini delle miscele chiuse e i provini delle miscele drenanti.

Inoltre, la dispersione dei risultati è leggermente superiore rispetto alle miscele per strato di base, ma il valore della deviazione standard è del tutto confrontabile per le due miscele drenanti analizzate.

È da notare immediatamente che la miscela H presenta una percentuale di vuoti decisamente minore rispetto alla miscela GC. Questo non può far altro che portare, come è visibile dai risultati ottenuti, ad una resistenza a trazione indiretta (ITS) della miscela H decisamente maggiore rispetto a quella GC.

Questa grande differenza nelle caratteristiche volumetriche dei provini delle due miscele potrebbe essere la conseguenza di una granulometria differente, causata da un'errata produzione in impianto. In alternativa, la motivazione potrebbe essere da ricercare in un'errata compattazione dei provini in laboratorio (in particolare quelli della miscela GC, che presentano una percentuale di vuoti intorno al 25%). A tal proposito, sono attualmente in corso delle verifiche finalizzate a chiarire questo aspetto.

Per tali ragioni, i risultati ottenuti sono da considerare inconcludenti, in quanto non permettono un effettivo confronto tra le miscele. Pertanto, saranno necessarie ulteriori prove in futuro.

## 3.2 PROVA CANTABRO

La prova Cantabro è servita a determinare l'indice PL (*Particle Loss*), necessario a capire il comportamento meccanico della miscela dello strato drenante nei confronti della resistenza alla frammentazione.

È da evidenziare che da un valore alto di PL si deduce una bassa resistenza alla frammentazione del materiale testato.

La prova PL è stata svolta su un totale di 12 provini confezionati con miscele per strato drenante. In particolare:

- 6 provini della miscela con compound polimerico al grafene (GC)
- 6 provini della miscela con bitume modificato SBS Hard (H)

Di seguito sono riportati i risultati.

Prima vengono presentati i risultati in forma tabellare, che includono l'indice PL ed altre informazioni, cioè la deviazione standard (PLdevst) e la %Vuoti.

Successivamente vengono riportati i diagrammi che rappresentano i valori dei PL risultanti per ogni provino di ciascuna miscela ed in asse secondario la percentuale di vuoti, rappresentati dalla curva.

Infine, verranno mostrati e confrontati (in forma tabellare e grafica) i risultati medi ottenuti per ciascuna delle miscele studiate.

I risultati della miscela GC sono i seguenti:

MISCELA GC (GRAPHENE COMPOUND)							
TEST DRY 28/10/2020							
PROVINO	W1 [g]	W2 [g]	PL [%]	%Vuotigeom [%]	PLmedio [%]	PLdevst [%]	%Vuotigeom [%] medio
GC17	1009,9	675,7	33,1	20,78	33,2	11,3	20,61
GC18	1008,7	614,9	39,0	21,05			
GC19	1007,2	778,7	22,7	20,48			
GC20	1004,5	761,2	24,2	19,48			
GC21	1007,3	731,9	27,3	20,30			
GC22	1005,3	475,5	52,7	21,55			

Tabella 3.8

Risultati miscela GC

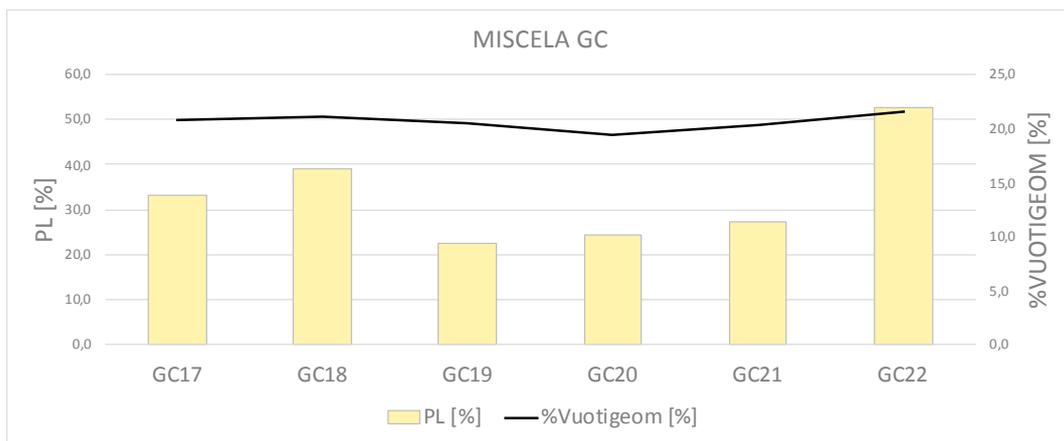


Figura 3.13

Diagramma dei PL dei provini GC

I risultati della miscela H sono i seguenti:

MISCELA H (HARD BITUMINOUS MIXTURES MODIFIED)							
TEST DRY 28/10/2020							
PROVINO	W1 [g]	W2 [g]	PL [%]	%Vuotigeom [%]	PLmedio [%]	PLdevst [%]	%Vuotigeom [%] medio
H17	1005,0	565,6	43,7	20,87	38,7	12,7	20,59
H18	1007,0	805,7	20,0	19,26			
H19	1008,7	691,6	31,4	20,33			
H20	1002,2	419,9	58,1	21,21			
H21	1007,5	613,7	39,1	21,13			
H22	1003,3	603,4	39,9	20,74			

Tabella 3.9

Risultati miscela H

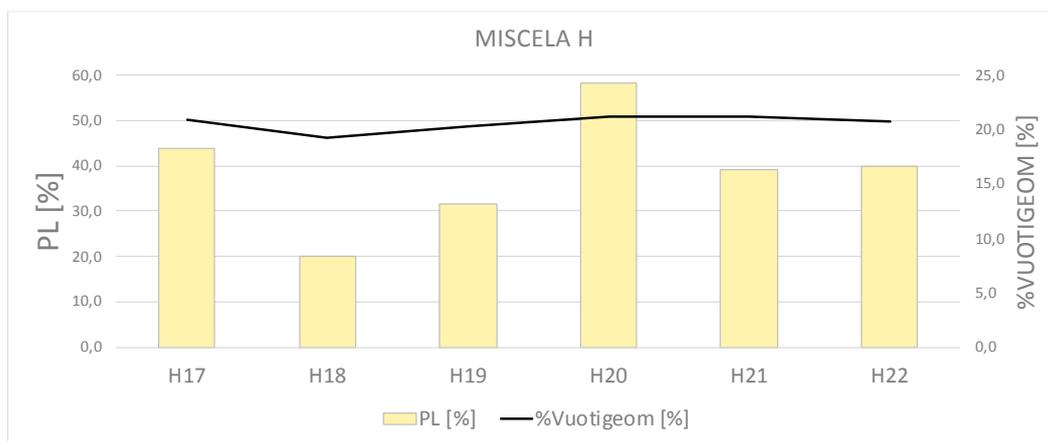


Figura 3.14

Diagramma dei PL dei provini H

I risultati finali delle miscele sono qui riassunti:

MISCELA	PL medio [%]	PL devst [%]	%Vuotigeom [%] medio
H	38,7	12,7	20,59
GC	33,2	11,3	20,61

Tabella 3.10  
Risultati finali miscele

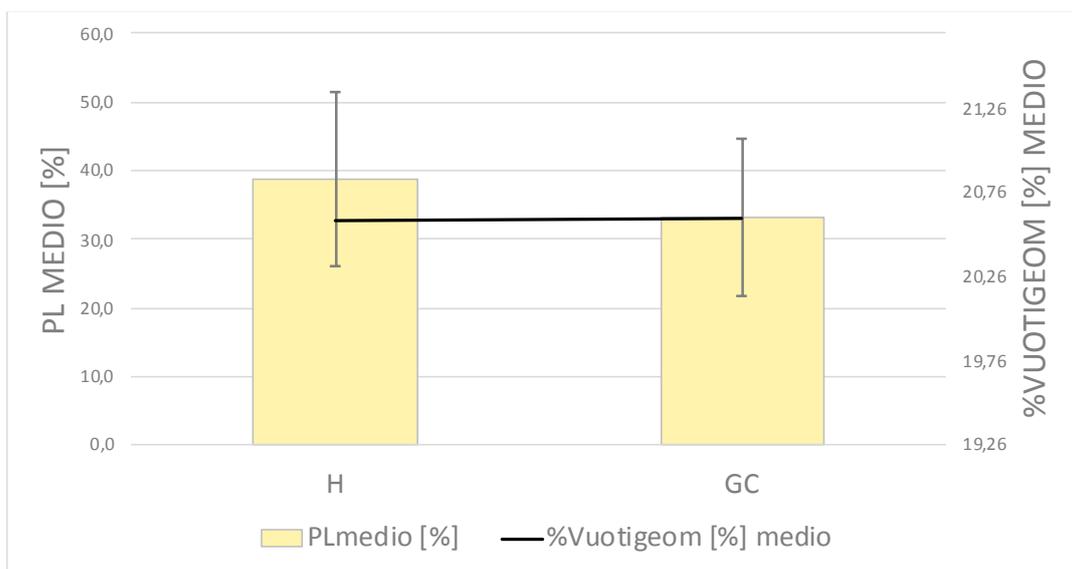


Figura 3.15

Diagramma dei PL medi delle miscele con rispettive deviazioni standard

Si può notare che per entrambe le miscele i risultati sono notevolmente dispersi.

I valori di PL medi (riportati in *Figura 3.15*) sono da considerarsi molto elevati (solitamente si considera accettabile un valore di PL inferiore al 20% in condizioni asciutte). Inoltre, nonostante un contenuto di vuoti sostanzialmente identico, un confronto significativo tra le due miscele non è reso possibile dai valori molto alti di deviazione standard.

A tal proposito, precedenti esperienze di laboratorio hanno evidenziato che provini compattati (come nel caso in esame) con la pressa giratoria a 40 giri

(alternativa consentita dalla norma di riferimento [UNI EN 12697-17]) sono caratterizzati tipicamente da valori del contenuto dei vuoti superiori al 20%, che comportano valori molto alti di PL e un'elevata dispersione dei risultati. Al contrario, i risultati sono più affidabili nel caso di provini preparati con il compattatore Marshall applicando 50 colpi per faccia (altra possibilità consentita dalla norma di riferimento), che risultano caratterizzati da una percentuale di vuoti sensibilmente inferiore.

Pertanto, per un confronto effettivo tra le miscele, è auspicabile eseguire ulteriori prove su provini preparati con il compattatore Marshall.

## CAPITOLO 4

### CONCLUSIONI

La caratterizzazione meccanica di diverse miscele in conglomerato bituminoso è stata svolta mediante indagine sperimentale in laboratorio, attraverso la prova a trazione indiretta e la prova Cantabro.

I risultati di questa caratterizzazione hanno portato come valori finali le resistenze a trazione indiretta (ITS) ed alla frammentazione (PL).

L'analisi dei valori finali, infine, ha reso possibile comprendere e mettere a confronto le diverse miscele.

Le miscele sono suddivise in PmA (miscele con modifica dry) con l'utilizzo di compound polimerico (PC) e compound polimerico al grafene (GC).

Ed in PmB (miscele con modifica wet) attraverso polimeri SBS Hard (H).

Sono stati analizzati in totale 12 provini (di tipo PC, GC e H) di conglomerato chiuso destinato a strati di base e 24 provini (di tipo GC e H) di conglomerato aperto destinato a strati d'usura drenante.

In seguito all'analisi dei risultati, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Le prove ITS effettuate sulle miscele per strato di base hanno evidenziato valori di resistenza a trazione indiretta paragonabile per le tre miscele studiate (H, GC e PC). Tuttavia, la miscela H è caratterizzata da un contenuto di vuoti medio leggermente inferiore rispetto alle altre. Pertanto, a parità di vuoti, potrebbe esibire valori di ITS inferiori rispetto alle miscele con i compound.

- Le prove ITS eseguite sulle miscele per strato drenante hanno portato a risultati inconcludenti per via del contenuto di vuoti significativamente diverso per le due miscele studiate (H e GC). Tale differenza potrebbe essere la conseguenza di una granulometria differente, causata da un'errata produzione in impianto, o di un'errata compattazione dei provini in laboratorio.
- Le prove Cantabro effettuate sulle miscele H e GC per strato drenante non hanno consentito un effettivo confronto tra i materiali a causa dell'elevata dispersione dei risultati, probabilmente dovuta al metodo di compattazione dei provini adottato (40 giri con pressa giratoria).

Pertanto, per arrivare a conclusioni definitive, sono necessarie ulteriori prove, soprattutto sulle miscele drenanti. In particolare, è auspicabile prevedere l'esecuzione di ulteriori prove ITS (a parità di vuoti) e prove Cantabro su provini preparati con il compattatore Marshall.

## BIBLIOGRAFIA

- [UNI EN 12697-23] “*Miscela bituminosa, Metodi di prova, Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi*”
- [UNI EN 12697-17] “*Miscela bituminosa, Metodi di prova, Perdita di particelle del provino di asfalto poroso*”
- [UNI EN 12697-6] “*Miscela bituminosa, Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo, Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi*”
- [UNI EN 12697-5] “*Miscela bituminosa, Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo, Determinazione della massima densità*”
- [UNI EN 1426] “*Bitumi e leganti bituminosi, Determinazione della penetrazione con ago*”
- [UNI EN 1427] “*Bitumi e leganti bituminosi, Determinazione del punto di rammollimento, Metodo biglia e anello*”
- [UNI EN 12697-30] “*Miscela bituminosa, Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo, Preparazione del provino mediante compattatore a impatto*”
- [UNI EN 12697-31] “*Miscela bituminosa, Metodi di prova, Preparazione del provino con pressa giratoria*”
- [UNI EN 1097-2] “*Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati, Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione*”