

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile**

***CARATTERIZZAZIONE PRESTAZIONALE DI  
CONGLOMERATI BITUMINOSI PER CIRCUITI  
AUTOMOBILISTICI***

ELABORATO FINALE DI:  
Luca Resca

RELATORE:  
Chiar.mo Prof. Ing. Andrea Simone

CORRELATORI:  
Dott. Ing. Francesco Petretto  
Dott. Ing. Matteo Pettinari

III Sessione

---

Anno Accademico 2010/2011









## **PAROLE CHIAVE**

*Distacco degli Aggregati*

*Circuito di Monza*

*Circuito di Imola*

*Circuito del Mugello*

*Percentuale dei Vuoti*

*Prova ITSM*

*Cantabro Loss Test*



## **INDICE**

<b>INDICE.....</b>	<b>I</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1 - IL FENOMENO DEL DISTACCO DEGLI AGGREGATI..</b>	<b>7</b>
1.1.    INTRODUZIONE.....	7
1.2.    IL DISTACCO .....	7
1.3.    CAUSE GENERANTI IL DISTACCO.....	9
1.4.    PUNTI CRITICI.....	12
1.5.    IL DETERIORAMENTO DELLE CARATTERISTICHE FUNZIONALI .....	14
1.6.    AZIONI DI PREVENZIONE DEL FENOMENO .....	21
1.7.    INTERVENTI DI MANUTENZIONE .....	22
1.8.    NORME FIA.....	25
<b>CAPITOLO 2 - IL PROGRAMMA SPERIMENTALE .....</b>	<b>31</b>
2.1.    INTRODUZIONE.....	31
2.2.    LO STUDIO SPERIMENTALE .....	32
2.3.    LA FLOW CHART.....	35
2.4.    CARATTERISTICHE DEI LEGANTI E DEGLI AGGREGATI.....	36
2.4.1.    Bitume 70-100.....	36
2.4.2.    Bitume LOWAL HM40 .....	37
2.4.3.    Aggregati basaltici .....	38
2.4.4.    Aggregati porfirici.....	38
2.4.5.    Aggregati calcarei .....	38
2.5.    CARATTERISTICHE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI.....	39
2.5.1.    Miscela di Prova.....	39
2.5.2.    Imola .....	41
2.5.3.    Monza.....	42
2.5.4.    Mugello .....	43
2.6.    CONCLUSIONI.....	45



---

<b>CAPITOLO 3 - METODOLOGIE DI PROVA .....</b>	<b>49</b>
3.1	INTRODUZIONE..... 49
3.2	FASE I: METODI DI COMPATTAZIONE..... 50
3.2.1	Compattazioni in Sito..... 51
3.2.2	Compattazione Marshall ..... 55
3.2.3	Pressa a taglio giratoria ..... 59
3.2.4	Roller Compactor..... 69
3.3	FASE II: TEST DI CARATTERIZZAZIONE VOLUMETRICA..... 73
3.3.1.	Massa volumica Massima ..... 74
3.3.2.	Massa volumica Apparente..... 77
3.3.3.	Percentuale dei Vuoti ..... 81
3.4	FASE III: TEST DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA ..... 82
3.4.1	Prova ITSM..... 83
3.4.2	Prova Cantabro..... 85
<b>CAPITOLO 4 - ANALISI DEI RISULTATI.....</b>	<b>91</b>
4.1	TEST DI CARATTERIZZAZIONE VOLUMETRICA ..... 91
4.1.1	Massa volumica massima..... 92
4.1.2	Massa volumica apparente ..... 93
4.1.3	Percentuale dei vuoti..... 99
4.1.4	Addensamento..... 105
4.2	TEST DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA ..... 110
4.2.1	Modulo di rigidità dinamica ..... 110
4.2.2	Perdita in peso ..... 121
<b>CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI.....</b>	<b>129</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>141</b>
<b>RIFERIMENTI NORMATIVI .....</b>	<b>143</b>



# *Introduzione*







## ***INTRODUZIONE***

Le sovrastrutture stradali impiegate nei circuiti automobilistici o motociclistici sono sottoposte all'azione continua e ammalorativa del passaggio ripetuto di veicoli da corsa. Con il progredire della tecnologia, le alte velocità e le accelerazioni raggiunte dalle monoposto hanno fatto sì che gli pneumatici scaricassero sulla pavimentazione stradale sollecitazioni via via sempre maggiori, nettamente superiori a quelle ottenute dalle normali autovetture nelle strade urbane. Tali sollecitazioni portano quindi al deterioramento del conglomerato bituminoso costituente la pavimentazione del circuito automobilistico, in maniera più evidente e frequente rispetto agli ammaloramenti presenti nelle sovrastrutture stradali ad uso civile.

Nasce allora l'esigenza di studiare da vicino il problema del deterioramento della pavimentazione degli autodromi, vedendo dove e come esso si verifichi e studiandone le cause. Questo tema, essendo a stretto contatto con il fattore della sicurezza, è infatti molto sentito, specialmente al giorno d'oggi, per via dell'alto numero di incidenti, anche mortali, che si verificano durante le competizioni automobilistiche.

Una volta evidenziati il problema e le sue cause sottostanti, si cerca di esaminare le caratteristiche prestazionali che i conglomerati bituminosi devono avere per contrastare tale fenomeno. Il comportamento delle sovrastrutture stradali è infatti influenzato dalla distribuzione granulometrica, dalle caratteristiche degli aggregati, dalle condizioni di mix design ed infine dalle proprietà del legante della miscela bituminosa impiegata. Proprio per questo motivo, un approfondito studio del conglomerato bituminoso è fondamentale per poter marginare il problema del deterioramento della pavimentazione specialmente negli autodromi.

Dopo aver prelevato le miscele bituminose durante le stese nei vari autodromi italiani, si è quindi passati alla fase sperimentale di ricerca dove, tramite l'utilizzo di differenti macchinari, si sono compattati e testati i provini al fine di ottenere valori numerici che descrivessero le caratteristiche volumetriche ed il comportamento meccanico del conglomerato bituminoso sotto determinate sollecitazioni.

Infine, risultati alla mano, si è cercato di analizzare quei valori che influenzassero il problema del distacco degli inerti; capire a cosa essi fossero dovuti e soprattutto cosa fare per prevenirli.

Solo con l'attenta e precisa esaminazione di un numero elevatissimo di provini è stato possibile ottenere valori soddisfacenti che hanno indirizzato la ricerca verso risultati importanti per l'ingegneria stradale nel campo degli autodromi.

# *Capitolo 1*

## *Il Fenomeno del distacco degli Aggregati*





## **Capitolo 1 - IL FENOMENO DEL DISTACCO DEGLI AGGREGATI**

### **1.1. Introduzione**

Il problema del distacco degli aggregati dalla pavimentazione stradale è un fenomeno molto diffuso sia nelle strade urbane sia nei circuiti automobilistici. Ciò avviene quando gli inerti costituenti il conglomerato bituminoso di una pavimentazione, per via di determinate forze o sollecitazioni, si distaccano dal legante, divenendo così materiale sciolto.

Il seguente capitolo affronta questo problema, tanto diffuso quanto pericoloso, partendo dallo studio della sua origine e degli effetti deleteri che esso provoca a livello del manto stradale e, concludendo, con l'illustrare, tramite l'utilizzo di immagini ed esempi provenienti dagli autodromi italiani, gli interventi di manutenzione e le precauzioni adottate per arginarlo.

Si procede quindi ora ad illustrare attentamente il problema del distacco degli aggregati.

### **1.2. Il distacco**

Il fenomeno della disgregazione degli aggregati, meglio conosciuto con il termine inglese "Raveling", consiste nella separazione fisica degli inerti superficiali dalla pavimentazione stradale. Tali aggregati sono difatti esposti ad agenti meteorologici e a forze esterne come le sollecitazioni scaricate dagli pneumatici dei veicoli che tendono a deteriorarne qualità e caratteristiche.

Nel caso tali forze risultino essere modeste, il fenomeno che si ottiene è una *levigatura degli inerti* che porta, come si può vedere in figura 1.1, ad una

superficie stradale liscia e scivolosa per via della riduzione della micro e della macrorugosità.



*Figura 1.1 – Levigatura degli inerti*

Nel caso invece tali forze risultino essere cospicue, oltre al fenomeno della levigatura degli inerti si verifica anche quello della **disgregazione fisica**. I primi aggregati a consumarsi e poi a distaccarsi sono quelli fini che così lasciano sul manto stradale piccole cavità. Queste, con il progredire dell'erosione, aumentano di numero lasciando via via gli inerti più grossolani scoperti e soggetti anch'essi alle forze esterne con la loro conseguente frantumazione e quindi separazione dalla pavimentazione. Il manto stradale, come si può evincere dalla figura 1.2, assume così una superficie dall'aspetto ruvido e frastagliato, con la presenza molto pericolosa di materiale sciolto.



*Figura 1.2 – Disgregazione e distacco degli inerti*

In questo capitolo si esaminerà quindi il fenomeno del distacco degli aggregati dalla pavimentazione, analizzandone le cause e i fattori che l'accentuano, si descriveranno le procedure di manutenzione atte a prevenirlo e i trattamenti di riparazione.

Tale tema verrà studiato sia per le pavimentazioni ad uso stradale che per quelle rivolte agli autodromi italiani, nel rispetto delle norme FIA.

### ***1.3. Cause generanti il distacco***

I fattori che portano al verificarsi del distacco degli inerti sono molteplici e vanno ricercati nei più svariati campi, ma solo alcuni sono quelli fondamentali, specie per i circuiti automobilistici<sup>[1]</sup>:

- ***Le sollecitazioni:*** sebbene le sollecitazioni normali alla pavimentazione possano essere ritenute trascurabili (infatti il peso di un'autovettura di

---

<sup>[1]</sup> *Raveling of Hot-Mix Asphalt by Richard O. Wolters, P.E., Executive Director - Minnesota Asphalt Pavement Association*

Formula1 è di circa 600kg, pari alla metà del peso di una semplice utilitaria), tuttavia i motori permettono di sprigionare grandissime sollecitazioni sia longitudinali che trasversali. Difatti, le massime velocità e quindi accelerazioni raggiunte lungo i rettifili e soprattutto le forze trasversali sprigionate in curva per mantenere l'aderenza vengono scaricate dagli pneumatici sulla pavimentazione del circuito e quindi direttamente sui suoi aggregati.

- ***Qualità e pulizia degli aggregati:*** la scelta degli inerti è fondamentale per evitare un precoce e soprattutto veloce distacco. È consigliabile quindi la preferenza di aggregati aventi valori di Los Angeles e di Micro Deval (che determinano rispettivamente la resistenza alla frantumazione e all'usura) il più possibile bassi affinché possano resistere anche ad elevate sollecitazioni. Tuttavia, la scelta di un buon inerte non è sufficiente: bisogna verificare anche che sia pulito dalle impurità e ben essiccato affinché esso possa aderire bene al bitume senza che si interponga tra essi una pellicola che favorisca la disgregazione.
- ***Qualità del legante:*** oltre alla scelta degli aggregati è fondamentale anche quella del bitume. Difatti, proprio a quest'ultimo è affidato il compito di tenere legato a sé gli inerti nonostante le forze agenti sul conglomerato bituminoso. Poiché le sollecitazioni che si hanno nei circuiti automobilistici sono maggiori di quelle che si hanno nelle semplici strade urbane, è chiaro che la qualità del legante dovrà essere superiore. Un altro aspetto da tenere in considerazione nella scelta del legante è il suo invecchiamento. Infatti l'ossidazione dovuta all'aria e alla prolungata esposizione agli agenti atmosferici, in concomitanza con i raggi ultravioletti, altera e riduce le caratteristiche prestazionali del bitume. Scegliere un buon legante significa prediligere un bitume dalle elevate caratteristiche prestazionali e dal lento invecchiamento in grado di tenere legato a sé l'aggregato per tutta la vita utile della pavimentazione.



- **Disomogeneità:** oltre alle materie prime, bisogna prestare molta attenzione anche alla miscelazione. Difatti, nei silos utilizzati per confezionare la miscela, un errato o insufficiente amalgama fa sì che gli aggregati più grossolani tendano a depositarsi sul fondo mentre quelli più fini restino in superficie. Questo errore porta al fenomeno della disgregazione, ovvero una stesura non omogenea del conglomerato bituminoso. Ci saranno così zone aventi una miscela con soli aggregati fini ed altre aventi solo quelli grossi, con conseguente disomogeneità sia nelle caratteristiche che nel degrado.
  
- **Periodo della stesa:** è opportuno decidere con accuratezza il momento della stesa. Le condizioni metereologiche e climatiche infatti influiscono nettamente sulla qualità di compattazione. È altamente sconsigliata la stesa del conglomerato bituminoso in periodo autunnale o invernale, quando le temperature non sono sufficientemente elevate. L'ideale è quindi il periodo primavera-estate, ma è opportuno evitare anche in questo periodo le precipitazioni atmosferiche che, oltre ad abbassare la condizione termica della miscela, aggiungono ad essa una quantità d'acqua non irrilevante. Una cattiva compattazione porta ad una percentuale dei vuoti maggiore rispetto a quella di progetto. Maggiori sono gli interstizi, specialmente in superficie, maggiori saranno gli aggregati esposti alle sollecitazioni, e di conseguenza più veloce sarà il fenomeno del distacco.
  
- **Condizioni metereologiche:** la vita utile del conglomerato bituminoso è nettamente influenzata da fenomeni metereologici quali piogge e vento che portano ad un'erosione costante soprattutto degli aggregati. In più, l'acqua a rigide temperature può avere effetti deleteri sugli aggregati: se si infiltra nei vuoti superficiali e ghiaccia, aumenta di volume, portando quindi a pressioni interstiziali fortissime. Continui cicli di gelo e disgelo portano alla frantumazione degli aggregati superficiali e all'esposizione di quelli sottostanti. È quindi chiaro che a parità degli altri fattori, i conglomerati bituminosi stesi in luoghi più rigidi si deteriorano molto più velocemente.

#### **1.4. Punti critici**

Ora che sono stati mostrati il fenomeno del distacco degli aggregati e le cause ad esso sottostanti, si procede con l'illustrare le zone in cui questo problema si verifica.

Difatti, specialmente per le pavimentazioni dei circuiti automobilistici, è fondamentale non solo sapere dell'esistenza del fenomeno del distacco degli inerti, ma anche conoscere dove esso avvenga in maniera predominante, per poter monitorare la situazione con i sistemi di controllo più opportuni. Tale fenomeno è strettamente collegato alla sua causa. Infatti, se il distacco degli inerti è dovuto ad una scelta errata dei materiali impiegati per confezionare il conglomerato bituminoso (aggregati e legante dalle basse caratteristiche prestazionali oppure errata curva granulometrica degli inerti con scarso quantitativo di bitume), gli aggregati tendono a distaccarsi in maniera omogenea lungo tutta la pavimentazione stradale. Nel caso invece il fenomeno sia dovuto alle elevate sollecitazioni che insistono sul manto stradale, la perdita degli inerti non avviene in maniera costante ed omogenea lungo tutta la pavimentazione, ma si verifica prevalentemente nei punti in cui i veicoli scaricano a terra le maggiori sollecitazioni.

Specialmente per quanto riguarda gli autodromi, dove le monoposto percorrono lo stesso tracciato per un numero elevato di giri, esistono prevalentemente tre punti che risentono maggiormente di questo fenomeno:

- **Inizio della curva:** qui si ottengono le massime sollecitazioni longitudinali (per via delle decelerazioni). I piloti, infatti, per risparmiare decimi di secondo, tendono a ritardare il più possibile la frenata, riducendo sensibilmente la velocità in poche centinaia di metri; le conseguenti sollecitazioni longitudinali tendono dunque a distaccare gli inerti, spingendoli così verso la curva.



*Figura 1.3 – Inizio curva Parabolica Monza 2010 – on board camera Ferrari*

- **Centro della curva:** in questo punto si ottengono le massime accelerazioni laterali e quindi sollecitazioni trasversali. I piloti, cercando la massima velocità possibile, portano gli pneumatici a scaricare elevate sollecitazioni trasversali che tendono a staccare gli inerti e a spingerli verso l'esterno della curva.



*Figura 1.4 – Centro curva Parabolica Monza 2010 – on board camera Ferrari*

- **Fine della curva:** è il luogo più critico di ogni circuito. I piloti difatti tendono ad aprire il gas ancora in curva e quindi le altissime accelerazioni

longitudinali si vanno a sommare alle già presenti accelerazioni trasversali. Il risultato delle accelerazioni porta al raggiungimento del valore massimo delle sollecitazioni che gli pneumatici scaricano sugli inerti che tendono a distaccarsi per essere poi spinti verso la curva.



*Figura 1.5 – Fine curva Parabolica Monza 2010 – on board camera Ferrari*

### ***1.5. Il deterioramento delle caratteristiche funzionali***

La perdita di aggregati porta al deterioramento dell'intera pavimentazione con conseguenti problemi della viabilità. Difatti, quando la regolarità del manto stradale viene a mancare, vengono meno anche i presupposti che garantiscono il comfort e la sicurezza di guida. È quindi indispensabile tenere sempre monitorata la condizione del manto stradale e prevenire la formazione di eventuali fenomeni di degrado con opere di manutenzione.

Verranno ora analizzati i casi più frequenti di irregolarità che possono compromettere le caratteristiche della pavimentazione ad uso stradale e di quella impiegata in circuiti automobilistici.<sup>[2]</sup>

---

<sup>[2]</sup> Dispense del corso "Costruzione di strade, ferrovie ed aeroporti T", prof.ing. Giulio Dondi, A.A. 2010-2011

- **Fessurazioni:** si sviluppano a causa degli sforzi di trazione indotti negli strati legati a bitume dal carico ciclico veicolare, dalle variazioni di temperatura e dalle tecniche costruttive delle sollecitazioni che gli pneumatici scaricano sugli inerti che tendono a distaccarsi per essere poi spinti verso la curva. Nella figura seguente, si possono notare, in ordine di gravità, tipi di fessurazioni verificatesi nel manto stradale.



*Figura 1.6 – Fenomeno delle fessurazioni in una pavimentazione stradale*

- **Ondulazioni:** sono cedimenti generalizzati del piano viabile con profilo “tipo onda” che possono svilupparsi nelle direzioni longitudinale e trasversale della carreggiata pregiudicando la regolarità della pavimentazione. In figura si può notare tale ammaloramento della sovrastruttura viaria.



*Figura 1.7 – Fenomeno delle ondulazioni in una pavimentazione stradale*



Le ondulazioni sono un tipo di irregolarità molto presenti nei manti stradali e la loro causa è dovuta ad una scarsa resistenza meccanica degli strati legati o ad una plasticizzazione del conglomerato bituminoso. Tale fenomeno, come si vedrà, va tassativamente evitato soprattutto nei circuiti automobilistici dove la regolarità della pavimentazione è un fattore indispensabile.

- **Cedimenti:** sono depressioni localizzate oppure su vaste aree del piano viabile con profondità massima pari a  $8 \div 10$  cm e dotate anche di eventuali lesioni e fessurazioni. Tale degrado, che compromette il requisito della regolarità, è dovuto ad un'insufficiente compattazione, una scarsa qualità della miscela bituminosa o anche da un errato dimensionamento degli strati in conglomerato bituminoso. Anche la presenza di eventuali carichi eccessivi localizzati può portare al verificarsi di tale fenomeno.

In figura 1.8 si possono riscontrare cedimenti localizzati, cedimenti su vasta area e avvallamenti con sfondamento verificatisi nelle strade italiane.



*Figura 1.8 – Fenomeno dei cedimenti in una pavimentazione stradale*

- **Dissesti:** sono deformazioni plastiche dello strato di usura che causano la rottura del piano viabile con separazione degli aggregati ed affioramento del materiale lapideo.

Con questo fenomeno, dovuto ad una formulazione non corretta della miscela, ad una cattiva stesura o ad un'apertura precoce al traffico viene meno la regolarità e l'aderenza della pavimentazione.



Figura 1.9 – Fenomeno dei dissesti in una pavimentazione stradale

- **Buche:** sono avvallamenti localizzati con area massima di  $0,5 \text{ m}^2$  e profondità non superiore a 5 cm soggetti alla perdita dell'aggregato per effetto dell'acqua meteorica e del traffico. A seconda della severità del degrado, in genere dovuto alla scarsa percentuale del bitume, alla formulazione sbagliata della miscela o alla rapida perdita delle proprietà elastiche da parte del legante, viene quindi compromessa l'aderenza, la regolarità e la capacità portante della pavimentazione.



Figura 1.10 – Fenomeno delle buche in una pavimentazione stradale

- **Degradati dell'aderenza:** Sono degradi che compromettono le caratteristiche di microrugosità e macrorugosità alla base dell'aderenza superficiale per effetto della levigatura e distacco degli inerti ad opera dei veicoli oppure a causa dell'emersione del legante dallo strato d'usura.



Figura 1.11 – Fenomeno del degrado dell'aderenza in una pavimentazione stradale

Il distacco degli inerti dalla pavimentazione stradale porta quindi, come appena visto, al degrado dell'aderenza attraverso la perdita della macro e della microtessitura. Quest'ultime verranno ora illustrate con particolare riferimento al perché siano così importanti nel campo dell'ingegneria stradale.

Per **macro**tessitura si intende la rugosità dovuta all'insieme delle asperità superficiali intergranulari della pavimentazione; per **micro**tessitura, invece, s'intende quella rugosità dovuta alla scabrezza (ruvidezza) dei singoli elementi lapidei granulari impiegati nello strato superficiale della pavimentazione stradale.

La figura 1.12 rappresenta quanto detto:

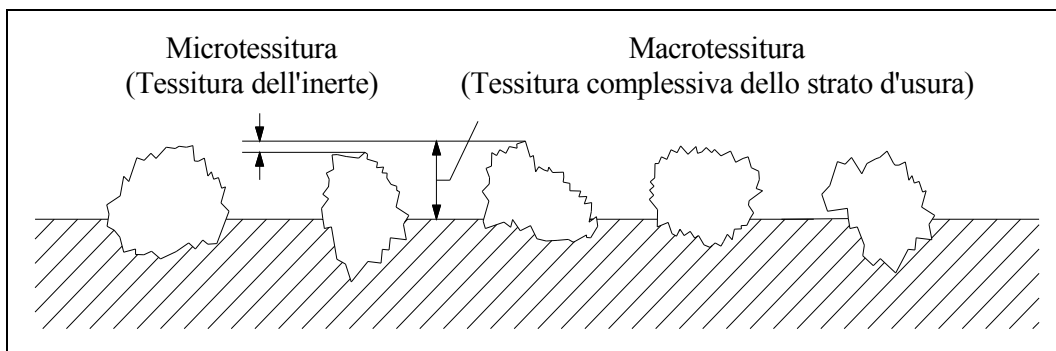


Figura 1.12 – Macro e microtessitura

Il ruolo fondamentale della rugosità nel campo della sicurezza si può intuire se si introduce il concetto di **aderenza**, ovvero quel fenomeno in virtù del quale una ruota in moto di rotolamento trasmette al terreno, attraverso le zone di reciproco contatto, tre sistemi di forze:



- Forze normali ( $F_z$ )
- Forze trasversali ( $F_y$ )
- Forze dirette nella direzione del moto ( $F_x$ )

Nel caso stradale bisogna distinguere il fenomeno dell'aderenza in due aspetti: l'aderenza longitudinale e quella trasversale.

L'aderenza longitudinale interessa le ruote gravate da un peso verticale  $P$  e da uno sforzo tangenziale  $F_x$  (o di trazione o di frenatura); le condizioni di aderenza sono verificate quando la ruota rotola sul terreno senza slittare.<sup>[3]</sup>

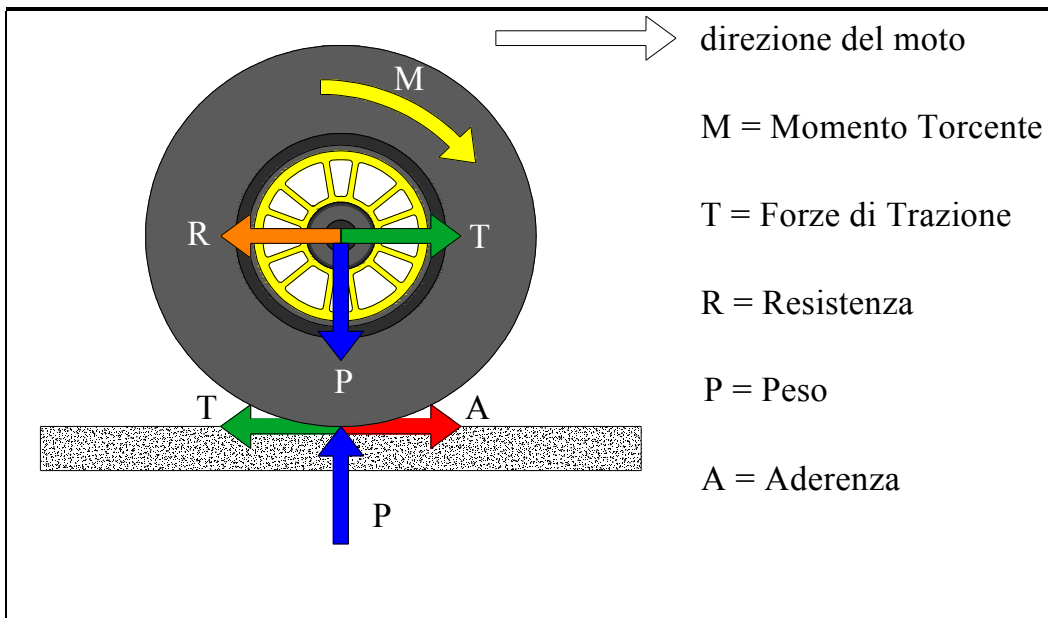


Figura 1.13 –Aderenza longitudinale

L'aderenza trasversale interessa le ruote soggette ad un peso verticale  $P$  e ad uno sforzo trasversale  $F_y$ ; analogamente al caso dell'aderenza longitudinale, si può affermare che le condizioni di aderenza risultano verificate se la ruota avanza sul piano viabile senza slittare lateralmente.

<sup>[3]</sup> Dispense del corso "Tecnica ed Economia dei Trasporti T", prof. ing. Luca Mantecchini, A.A. 2010-2011

L'aderenza (longitudinale o trasversale) si ottiene con la somma di due contributi:<sup>[4]</sup>

- L'adesione molecolare
- L'isteresi

La componente adesiva si sviluppa con il processo di attacco e stacco a livello molecolare, dovuto alla maggiore morbidezza della gomma rispetto alla strada. Lo slittamento della ruota provoca l'annullamento di questa adesione, come se avvenisse uno strappo. Affinché il meccanismo di adesione molecolare possa realizzarsi, è necessario che nei punti in cui le due superfici sono a contatto si eliminino gli strati d'acqua e le impurità e si stabiliscano aree di contatto pulite ed asciutte.

La componente di isteresi è dovuta invece al fatto che la gomma, passando sopra un'asperità del manto stradale, crea, in virtù delle sue proprietà, una distribuzione antisimmetrica di pressioni, la cui componente si oppone allo slittamento. Le deformazioni per isteresi sono pertanto causate dalle irregolarità superficiali e, proprio per questo, possono avvenire anche in presenza d'acqua ed impurità senza che si venga a stabilire un effettivo contatto asciutto tra le due superfici. Per valori di velocità fino a 50 km/h, la microtessitura superficiale della pavimentazione è il fattore dominante nel determinare i valori di aderenza in quanto le componenti di adesione molecolare sono prevalenti.

A velocità più elevate diviene sempre più difficile penetrare rapidamente il film d'acqua; l'aderenza dipende quindi largamente dalla componente di deformazione provocata dalle asperità presenti, che devono essere sufficientemente grandi ed angolose da deformare lo pneumatico anche in presenza di impurità o strati d'acqua.

Riassumendo, poiché la micro e la macro-rugosità sono i fattori responsabili dell'aderenza rispettivamente alle basse e alle alte velocità, è chiaro come sia fondamentale il ruolo degli aggregati nel conglomerato bituminoso e come sia necessario prevenirne un loro distaccamento.

---

<sup>[4]</sup> Stagni E., "Meccanica della Locomozione", 1980

### **1.6. Azioni di prevenzione del fenomeno**

Noto il problema della disgregazione degli aggregati, bisogna attuare delle precauzioni che tendano a contrastarlo e che quindi favoriscano una vita utile della pavimentazione maggiore. Oltre a evitare il verificarsi dei fattori descritti nel paragrafo 1.2, esistono altre accortezze che possono migliorare le qualità del conglomerato bituminoso in questione.

Oltre ad una buona scelta del legante e degli aggregati, bisogna prestare attenzione a non limitare eccessivamente la **quantità di filler** da utilizzare nella miscela. Il filler, inerte finissimo, tende infatti a riempire tutte i piccoli interstizi tra gli aggregati, rendendo così il conglomerato bituminoso più compatto e meno esposto alle sollecitazioni.

Un altro aspetto di fondamentale importanza è **l'apertura al traffico**. Una volta steso e compattato un nuovo manto stradale, è opportuno lasciarlo riposare e quindi ritardare l'apertura al traffico per garantire lo sviluppo totale dell'adesione tra inerte e legante. Il passaggio di veicoli su di una pavimentazione appena realizzata ha effetti deleteri in quanto compromette i lavori fatti per una buona compattazione. Specialmente se i veicoli scaricano grandi sollecitazioni, quest'ultime possono alterare il grado di addensamento del nuovo manto stradale e quindi far in modo che la percentuale dei vuoti della miscela non combaci con quella di progetto. Per gli autodromi, tra la stesa e l'apertura al traffico (gare automobilistiche) devono passare almeno 60 giorni, indispensabili a far maturare correttamente la miscela dalle elevate caratteristiche prestazioni.

La scelta di un buon modello di **drenaggio** superficiale è consigliata in quanto ridurrebbe il flusso d'acqua che attraversa il manto stradale. La presenza d'acqua infatti, come si è visto in precedenza, accentua il fenomeno della disgregazione degli aggregati a parità di sollecitazioni. È quindi raccomandato porre con una buona frequenza drenaggi sotterranei, pozzetti e tombini lungo tutta la lunghezza longitudinale del tracciato.

Bisogna prestare infine attenzione anche al metodo scelto per rimuovere sostanze oleose e soprattutto neve dal manto stradale. Specialmente in caso di ghiaccio,

bisogna essere consapevoli che, senza le dovute precauzioni, l'utilizzo di spazzaneve o di catene deteriorano visibilmente la macrotestitura del conglomerato bituminoso, portando ad una velocissima disgregazione degli aggregati superficiali. È consigliato quindi l'utilizzo di sabbie per rimuovere le sostanze unte e di prodotti antigelo per evitare che il ghiaccio provochi pressioni interstiziali all'interno delle cavità.

### **1.7. Interventi di manutenzione**

Superfici stradali che hanno patito il fenomeno della disgregazione degli aggregati richiedono trattamenti tempestivi per garantire quella sicurezza non più assicurata dall'aderenza. Queste opere di mantenimento possono essere considerate sia come manutenzione preventiva d'emergenza che come manutenzione correttiva. La scelta del trattamento dipende dal livello di gravità e dal livello di estensione del fenomeno del distacco degli inerti lungo la superficie stradale.<sup>[5]</sup>

Per quanto riguarda la gravità, esistono tre differenti livelli elencati in ordine crescente:

- **Basso:** solamente pochi aggregati fini si sono distaccati dal manto stradale, esponendo così alle sollecitazioni un relativo numero di aggregati grossi.
- **Medio:** la superficie ha una tessitura aperta ed è moderatamente ruvida con una considerevole perdita di aggregati sia grossi che fini.
- **Alto:** la maggior parte degli aggregati in superficie si sono distaccati dal conglomerato bituminoso. La superficie è gravemente ruvida e rovinata e può essere completamente rimossa in alcuni punti.

Anche per quanto riguarda l'estensione esistono tre livelli, sempre elencati in ordine crescente:

- **Occasionale:** meno del 20% della superficie è soggetta al distacco degli inerti.

---

<sup>[5]</sup> *Pavement Condition Evaluation Manual - Highway Preservation Systems, Ltd.- 01/10/01*

- **Frequente**: tra il 20% e il 50% della superficie è priva degli aggregati superficiali.
- **Estensivo**: più del 50% presenta inerti sciolti sul manto stradale.

Nel caso il distacco degli inerti sia di gravità basso/media ed estensione occasionale, si predilige utilizzare un **trattamento** non invasivo **d'emergenza** atto a prevenire che il fenomeno già iniziato diventi irreversibile. Questa manutenzione viene effettuata senza sostituire il manto stradale, facendo in modo di massimizzare la possibile aderenza tra lo pneumatico e la strada. Il mantenimento delle caratteristiche della strada può avvenire attraverso due accorgimenti:

- a. Rilevata la superficie in questione, si prendono provvedimenti ed accortezze per mantenerla sempre libera da ogni impurità e dal materiale sciolto che si è disgregato.
- b. Si tiene la superficie stradale sempre monitorata e si rimuove in maniera tempestiva neve, macchie d'olio e di combustibile che possono situarsi su di essa e che abbasserebbero drasticamente l'aderenza.

Nel caso invece il distacco degli inerti sia di alta gravità alto e di estensione frequente o estensiva, allora è richiesto un **trattamento correttivo** invasivo: questa manutenzione viene effettuata sostituendo il conglomerato bituminoso usurato e privo di aggregati con uno nuovo dalla macro e microtessitura intatte. È un trattamento più oneroso rispetto al precedente e richiede una fresatura del manto stradale vecchio seguita da una stesura a caldo di quello nuovo mediante vibrofinitrici. Una volta steso, il conglomerato bituminoso verrà poi compattato mediante appositi rulli, al fine di ottenere la percentuale dei vuoti richiesta.

In seguito verranno illustrate le recenti stese del nuovo manto superficiale negli autodromi italiani.



*Figura 1.14 –Stesa conglomerato bituminoso autodromo Imola*

La stesa del manto stradale dell'autodromo di Imola è stata eseguita in buone condizioni climatiche. Sebbene la presenza di nuvole, il periodo scelto per la manutenzione (inizio estate 2011) ha garantito una temperatura sufficiente a garantire un buon livello di compattazione.



*Figura 1.15 –Stesa conglomerato bituminoso autodromo Monza*

La stesa del conglomerato bituminoso del circuito di Monza è stata eseguita in ottime condizioni climatiche. Il periodo era Luglio 2011 e l'elevata temperatura ambientale (maggiore di 40°C) ha garantito una compattazione perfetta. Il conglomerato bituminoso frasato non garantiva più le condizioni di sicurezza nella curva Parabolica ed è quindi stato rimosso e sostituito.



*Figura 1.16 –Stesa conglomerato bituminoso autodromo Mugello*

Il periodo scelto per la stesa della pavimentazione stradale del rettilineo del Mugello non è ottimale. Difatti, la presenza di nubi non ha garantito la temperatura ideale di compattazione mediante rulli.

Tuttavia, si è riusciti ad evitare la pioggia, ovvero uno dei fenomeni principali che portano ad un veloce fenomeno del distacco degli aggregati.

### **1.8. Norme FIA**

La **FIA** (Fédération Internationale de l'Automobile) è l'organizzazione che programma i maggiori campionati automobilistici mondiali. Data la sua forte attenzione al tema della sicurezza, ha dettato norme precise riguardo le

caratteristiche superficiali che una pavimentazione impiegata in un circuito automobilistico deve avere.

Verranno quindi riportati, tradotti ed analizzati i paragrafi presenti nella normativa della FIA che trattano questo argomento: <sup>[6]</sup>

“Should be smooth and similar to the used on modern highways, which will help prevent the formation of a liquid film due to rain, oil or fuel. Preferably the surface should be the same the whole length of the track. If this proves impossible, it should be ensured that no change in surface occurs on sections of hard braking or acceleration, at important changes in longitudinal profile or in curves. Resurfacing should not be effected less than 60 days before an event.”

*“La pavimentazione di un circuito automobilistico dovrebbe essere liscia e il più simile possibile a quella utilizzata per le moderne autostrade. Tale caratteristica aiuterebbe a prevenire la formazione di patine di liquido dovute alla pioggia, alla perdita d’olio o di carburante. La superficie della pavimentazione dovrebbe essere preferibilmente la stessa in tutta la lunghezza del circuito. Se questo non dovesse risultare possibile, è necessario assicurare che non ci siano cambiamenti di superficie in sezioni di brusche frenate o accelerazioni, lungo importanti cambiamenti del profilo longitudinale e nelle curve. Il rifacimento del manto stradale non dovrebbe essere fatto a meno di 60 giorni dall’evento.”*

È chiaro come la FIA si focalizzi soprattutto sulla questione dell’aderenza presentando regole ferree per evitare la formazione di patine di liquido che abbasserebbero nettamente l’aderenza dello pneumatico.

Per prevenire un veloce degrado della pista, detta norme atte a salvaguardare i punti più problematici della pista, ovvero quelli in prossimità delle curve (come spiegato nel paragrafo 1.2).

Da notare infine come la FIA richieda almeno 60 giorni di tempo tra la stesa e l’utilizzo della pavimentazione per via dell’importanza dell’adesione tra inerte e legante descritti nel paragrafo 1.4.

---

<sup>[6]</sup> *Fia Norms, Revision 3 – IB – 29/11/94*



\*\*\*

“The recommended characteristics are as follows:

- Anti-skid properties: Measurement of the anti-skid properties of the surface is made by means of the pendulum-equipped apparatus made in England called “Skid Resistance Tester” (SRT) or by an official national method using the same principle. The minimum SRT value that is required is 65, with a tolerance of 20%.”

*“Le caratteristiche consigliate sono:*

- *Anti-slittamento: La misurazione dello slittamento viene effettuata mediante la prova del pendolo denominata “Prova della resistenza allo slittamento” (PVT) o attraverso un metodo nazionale che si basa sullo stesso principio. Il valore minimo della prova PVT richiesto è 65, con una tolleranza del 20%.”*

\*\*\*

“The recommended characteristics are as follows:

- Track plane: The plane of the track is dependant upon the geometrical shape of the roadway both in the longitudinal and lateral senses. Differences between the true profile of the surface layer and the which represents the mean true profile are geometrical irregularities. The plane equality of the surface must meet the following requirements:
  1. The surface must be exempt from any ondulations so that a 4 meter long straight rod laid on the finished surface shall adhere to it uniformly;
  2. A tolerance of 3 mm will be admitted only in a few points of the entire surface; at least 3 checks shall be made every 100 m of the track length.”

*“Le caratteristiche consigliate sono:*

- *Progetto del circuito: Il progetto del circuito dipende dalla forma geometrica della carreggiata nel senso sia longitudinale che trasversale.*

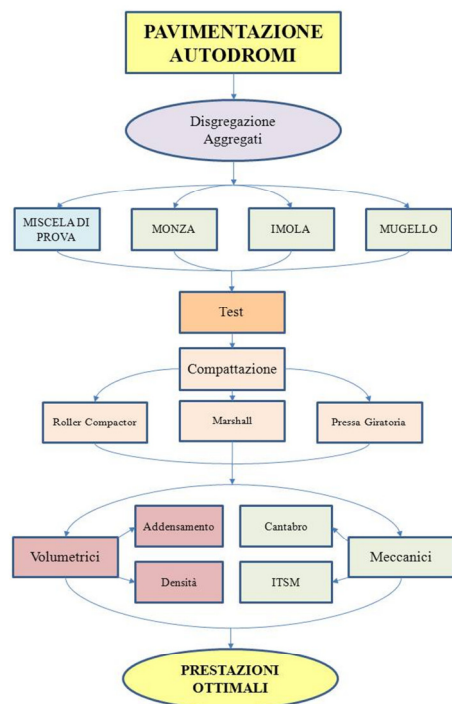
*Le differenze tra il profilo reale dello strato superficiale e quello medio sono le irregolarità geometriche. Il progetto di una superficie piana deve rispettare i*

*seguenti requisiti:*

- 1. La superficie deve essere esente da qualsiasi ondulazione in modo che un'asta dritta lunga 4 metri aderisca in modo uniforme alla superficie;*
- 2. Una tolleranza di 3 mm sarà ammessa solo in alcuni punti di tutta la superficie; si effettueranno almeno 3 controlli per ogni 100 metri di lunghezza della pista.”*

# Capitolo 2

## *Il Programma Sperimentale*





## **Capitolo 2 - IL PROGRAMMA SPERIMENTALE**

### **2.1. Introduzione**

Questo progetto di ricerca, come si è cercato di far apprezzare, presenta dunque come finalità quella di determinare quali caratteristiche rendano resistenti a elevate sollecitazioni i conglomerati bituminosi dei circuiti automobilistici.

Per arrivare a questo obiettivo bisogna stilare un apposito programma sperimentale, ovvero un elenco di fasi e di test da seguire al fine di ottenere risultati interessanti nel campo del distacco degli inerti; tale programma implica lo studio delle miscele bituminose prelevate da tre differenti circuiti italiani (Monza, Imola e Mugello), miscele che presentano lo stesso tipo di legante dalle elevate caratteristiche prestazionali (bitume *LOWVAL HM40*) ma tre differenti tipi di aggregati.

Attraverso tale analisi, si è potuto così notare come la scelta del tipo e della curva granulometrica degli inerti possa influenzare la risposta del conglomerato bituminoso alle varie sollecitazioni.

Ipotizzando che tale risposta non dipenda solo dagli aggregati ma anche dal legante, si è deciso allora di procedere al confezionamento di una miscela bituminosa avente inerti simili a quelli impiegati negli autodromi ed un bitume di tipo *70-100*, dalle caratteristiche nettamente inferiori rispetto al *LOWVAL HM40* ed impiegato esclusivamente per la realizzazione di strade urbane.

La differenza tra i risultati ottenuti con i diversi leganti sottolineerà come anche la scelta del bitume possa influire sulle caratteristiche prestazionali di un conglomerato bituminoso.

I criteri di valutazione sono dettati dalla misura diretta e dal confronto delle proprietà meccaniche e volumetriche dei materiali attraverso prove descritte dalla normativa *UNI EN*. È fondamentale anticipare che i risultati non dipendono esclusivamente dalla scelta dei materiali ma anche dalla scelta del metodo di compattazione, il quale, influenzando le proprietà volumetriche dei provini, condiziona anche le loro qualità meccaniche. È

utile pertanto confrontare i dati ottenuti solo da provini compattati nello stesso modo, pena la non veridicità dei risultati.

Al termine delle prove di laboratorio, dopo aver analizzato attentamente i valori ottenuti, si sono infine ricercate le cause che hanno portato alle differenti risposte dei conglomerati bituminosi; ciò ci permette di ottenere una panoramica completa delle caratteristiche prestazionali che le miscele bituminose devono avere per poter essere utilizzate in circuiti automobilistici.

## **2.2. Lo studio sperimentale**

La presente ricerca si focalizza sullo studio di un conglomerato bituminoso (miscela di prova) confezionato in laboratorio e di tre miscele bituminose prelevate dagli autodromi italiani di Monza, Imola e del Mugello. La miscela di prova è stata realizzata con aggregati di tipo basaltico prelevati da una cava in provincia di Bologna e con il bitume tradizionale 70-100 ad uso stradale. Gli altri tre conglomerati bituminosi, invece, poiché provengono da circuiti automobilistici caratterizzati da forti sollecitazioni, vedono come legante impiegato il bitume dalle elevate caratteristiche prestazionali *LOWVAL HM40*, e come aggregati tre tipi di inerti differenti: porfido per il conglomerato bituminoso di Imola, calcare per quello di Monza ed infine basalto per quello del Mugello. Una scelta variegata di leganti ed aggregati è utile per riscontrare, tramite opportuni test di laboratorio, le differenze prestazionali delle diverse miscele bituminose. Tramite la tabella 2.1 si può notare in maniera schematizzata quanto sopra detto:

Miscela di Prova		Imola	
Legante	Aggregati	Legante	Aggregati
<i>Bitume 70-100</i>	Basalto	<i>LOWVAL HM40</i>	Porfido
Monza		Mugello	
Legante	Aggregati	Legante	Aggregati
<i>LOWVAL HM40</i>	Calcare	<i>LOWVAL HM40</i>	Basalto

*Tabella 2.1 – Caratteristiche conglomerati bituminosi analizzati*

Il loro studio passa attraverso quattro fasi principali che verranno poi dettagliatamente spiegate e schematizzate nella flow chart. È utile affermare che le fasi devono essere eseguite in un ordine determinato, in modo da tenere per ultime le prove più invasive che possono compromettere le caratteristiche fisiche del provino.

***Fase I: Compattazione dei provini mediante procedure differenti***

Nella prima fase si procede con la compactazione dei provini tramite tre metodi differenti. Procedure di compactazione differenti conferiscono ai provini diversi gradi d'addensamento e, di conseguenza, caratteristiche volumetriche dissimili. La scelta del metodo di compactazione dipende quindi dal test a cui si vogliono sottoporre i provini e dalle caratteristiche prestazionali che si desiderano ottenere. I metodi utilizzati per la compactazione delle miscele bituminose prelevate dagli autodromi italiani sono state, in ordine cronologico, le seguenti:

- *Compattazione Marshall*, in accordo alla norma UNI EN 12697-30;
- *Compattazione Pressa a Taglio Giratoria*, in accordo alla norma UNI EN 12697-31;
- *Compattazione mediante Rullo Compattatore*, in accordo alla norma UNI EN 12697-34.

***Fase II: Realizzazione dei test volumetrici***

Nella seconda fase, compactati i provini con i differenti metodi di compactazione, si procede con l'analisi dei campioni mediante prove poco invasive atte a determinare le caratteristiche intrinseche e fisiche del conglomerato bituminoso. Lo studio di tali test permette di fare un primo confronto tra le qualità delle diverse miscele bituminose prelevate durante le stese degli autodromi ma anche di paragonare le diverse caratteristiche dei provini ottenuti dallo stesso conglomerato bituminoso ma compactati in maniera differente. I test volumetrici impiegati nella seguente ricerca sono stati, in ordine di utilizzo, i seguenti:

- *Pesate*;
- *Determinazione della Massa Volumica Massima*, in accordo alla norma UNI EN 12697-5

- *Determinazione della Massa Volumica Apparente*, in accordo alla norma UNI EN 12697-6;
- *Determinazione della Percentuale dei Vuoti*, in accordo alla norma UNI EN 12697-8.

***Fase III: Realizzazione dei test meccanici***

Nella terza fase si procede con l'analisi dei provini mediante prove di tipo meccanico che mostrano come il conglomerato bituminoso risponda a determinate sollecitazioni. Il comportamento dei campioni sotto determinate forze dipende sia dalla qualità della miscela bituminosa sia dalle sue caratteristiche volumetriche influenzate dal metodo di compattazione. Questi test, a differenza di quelli volumetrici, poiché applicano ai provini delle forze anche rilevanti, tendono a danneggiarne le caratteristiche fisiche. Di conseguenza, le prove meccaniche devono essere eseguite in maniera tale che i test più invasivi, che deteriorano completamente il campione, vengano effettuati per ultimi. Le prove effettuate sui campioni analizzati sono state, in ordine di utilizzo, le seguenti:

- *Prova ITSM*, in accordo alla norma UNI EN 12697-26;
- *Cantabro Loss Test*, in accordo alla norma UNI EN 12697-17.

***Fase IV: Elaborazione dei dati***

Nell'ultima fase, eseguiti sia i test volumetrici sia quelli meccanici, si elaborano i risultati cercando di individuare quali siano le caratteristiche ideali che rendano un conglomerato bituminoso ottimo dal punto di vista prestazionale. Si può quindi determinare quali siano, tra quelle analizzate, le miscele bituminose aventi le migliori qualità per poter resistere alle sollecitazioni provocate dagli pneumatici delle vetture di Formula 1 e al fenomeno della disgregazione degli aggregati. A parità di conglomerato bituminoso, si può anche determinare come il metodo di compattazione influisca sulle caratteristiche volumetriche e quindi prestazionali dei campioni.

Poiché i risultati ottenuti da ogni provino sono di tipo aleatorio, bisogna sottolineare che, per ottenere una buona elaborazione dei dati, bisogna sottoporre ai test un alto numero di campioni in modo tale che la media dei risultati sia la più veritiera possibile.



### 2.3. La Flow Chart

Si è quindi rappresentato, tramite una Flow Chart (diagramma di flusso), il programma sperimentale scelto, al fine di rendere il più chiaro possibile l'ordine dei processi affrontati.

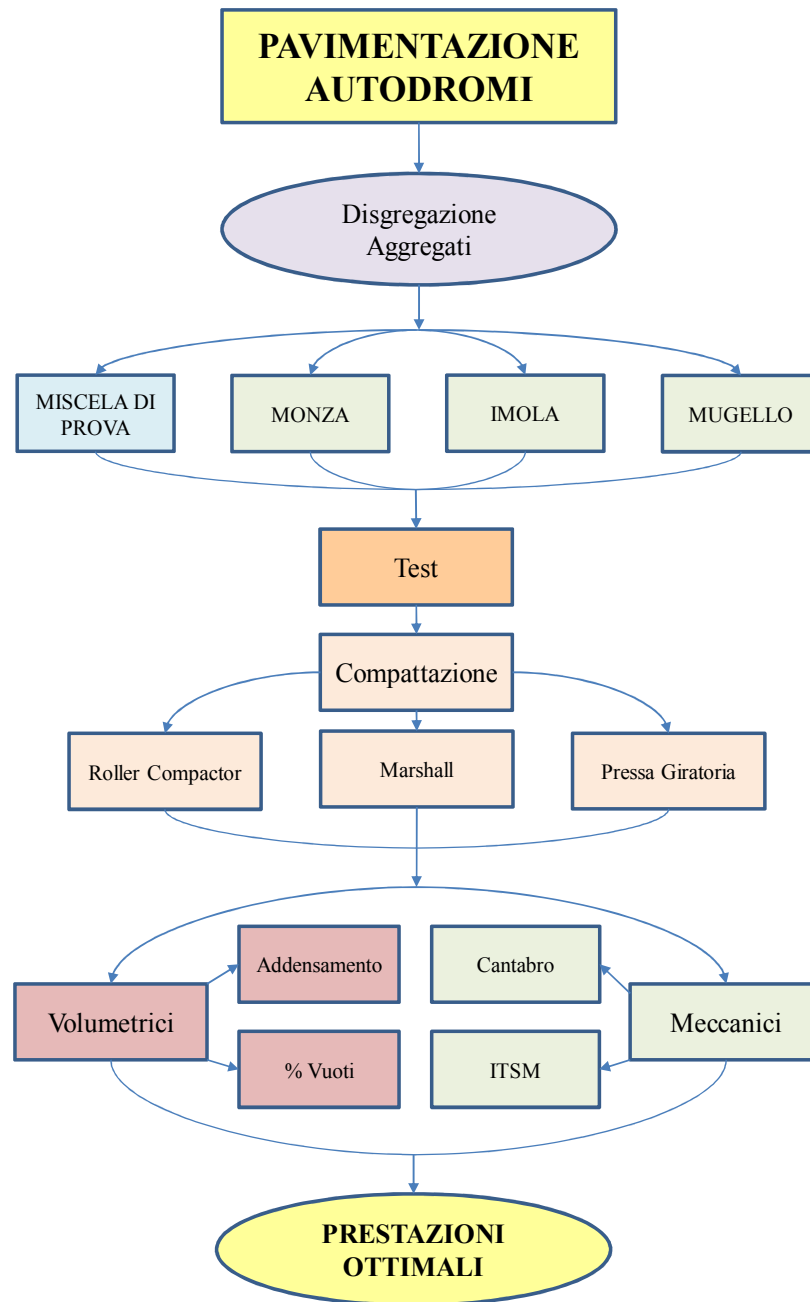


Figura 2.1 – Flow Chart riassuntiva della sperimentazione

Prima di procedere con la sperimentazione, si sono analizzate le caratteristiche intrinseche dei conglomerati bituminosi prelevati. Si sono quindi prima esaminate le proprietà dei singoli leganti ed aggregati che li compongono. Dopo aver studiato i materiali, si analizzano quindi le miscele bituminose

## **2.4. Caratteristiche dei leganti e degli aggregati**

In questo paragrafo vengono esaminati i materiali dei conglomerati bituminosi che sono stati finora presi in considerazione. I leganti impiegati, come si può notare dalla tabella 2.1, sono di due tipi:

- *Bitume 70-100*: impiegato come legante nella miscela bituminosa di prova;
- *Bitume LOWVAL HM40*: impiegato come legante nelle tre miscele provenienti dagli autodromi di Imola, Monza e del Mugello.

Gli aggregati impiegati nel confezionamento dei conglomerati bituminosi esaminati sono di tre tipi:

- *Aggregati basaltici*: impiegati come nella miscela bituminosa di prova e nel conglomerato bituminoso proveniente dal Mugello;
- *Aggregati porfirici*: impiegati nel conglomerato bituminoso proveniente da Imola;
- *Aggregati calcarei*: impiegati nel conglomerato bituminoso proveniente da Monza.

Si procede quindi ora con l'analizzare in maniera dettagliata i punti sopra elencati.

### **2.4.1. Bitume 70-100**

Il bitume *70-100* è un legante dalle normali caratteristiche prestazionali prodotto in raffineria mediante opportuni processi industriali. Nel settore stradale ed aeroportuale sono impiegati nella realizzazione dei conglomerati bituminosi costituenti sovrastrutture flessibili. La gradazione *70-100* significa che tale bitume, se sottoposto al test di Penetrazione normato dalla *UNI EN 1426*, subisce una penetrazione di  $70 \div 100$  dmm

da parte di un apposito ago. Tramite la tabella seguente, fornita dalla società Eni, si possono notare le caratteristiche prestazionali di tale bitume.<sup>[7]</sup>

<b>Caratteristiche</b>	<b>Metodo di Prova</b>	<b>Unità di Misura</b>	<b>Range Valori</b>
Penetrazione a 25°C, 100g/5''	EN 1426	dmm	70 ÷ 100
Punto di rammollimento	EN 1427	°C	43 ÷ 51
Viscosità dinamica 60°C	EN 13702-1	Paxs	≥ 90
Punto di rottura Fraaß	EN 12593	°C	≤ -10
Densità relativa 25/25°C	EN ISO 3838	-	1,00 ÷ 1,07
Duttilità a 25°C	CNR BU 44	cm	≥ 100

Tabella 2.2 – Caratteristiche bitume 70-100

#### 2.4.2. Bitume LOWAL HM40

Il legante *LOWAL HM40* è un bitume modificato con polimeri *SBS* (modifica *HARD*) a viscosità controllata. L'aggiunta di tali polimeri rende il legante specifico per conglomerati bituminosi chiusi (ovvero con vuoti minore al 6%) di base e di collegamento e che hanno elevate caratteristiche di modulo complesso dinamico.

I conglomerati prodotti con questo legante manifestano caratteristiche di addensabilità e lavorabilità semplificata sotto l'azione dei rulli a tutte le temperature superiori ai 90°C. Tramite le tabelle seguenti, fornite dalla ditta Valli Zabban, si possono notare le caratteristiche prestazionali e le condizioni operative per una corretta stesura di conglomerati bituminosi aventi tale bitume.<sup>[8]</sup>

<b>Caratteristiche</b>	<b>Metodo di Prova</b>	<b>Unità di Misura</b>	<b>Range Valori</b>	<b>Valori Tipici</b>
Penetrazione a 25°C, 100g/5''	EN 1426	dmm	30 ÷ 50	32
Punto di rammollimento	EN 1427	°C	> 70	80
Viscosità dinamica 160°C	EN 13702-1	Pas	> 0,4	0,45
Punto di rottura Fraaß	EN 12593	°C	≤ -10	-15

Tabella 2.3 – Caratteristiche bitume LOWAL HM40

<sup>[7]</sup> Revisione 002050-01-06 della società Eni S.p.A.

<sup>[8]</sup> Revisione 2-04-10 della ditta Valli Zabban

<b>Condizioni Operative</b>	<b>Unità di Misura</b>	<b>Valori Indicativi</b>
Temperatura di stoccaggio ottimale	°C	170
Temperatura di stoccaggio per max 3 gg	°C	180
Temperatura di stoccaggio prolungato oltre 5 gg	°C	140
Temperatura di impasto con inerti	°C	140 ÷ 180
Temperatura di compattazione	°C	> 100

Tabella 2.4 – Condizioni operative bitume LOWAL HM40

### 2.4.3. Aggregati basaltici

Il **basalto** è una roccia effusiva di origine vulcanica di colore scuro o nero, con un contenuto di silice (SiO<sub>2</sub>) relativamente basso e una elevata percentuale di plagioclasio, calcico e pirosseni. Esso proviene da un magma solidificatosi velocemente a contatto dell'aria o dell'acqua ed è la principale roccia costituente la parte superiore della crosta oceanica. In Italia, le cave per l'estrazione del basalto si trovano prevalentemente nella regione del Lazio. La densità degli aggregati basaltici risulta essere 2800÷2950 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.4.4. Aggregati porfirici

Il **porfido** è una roccia vulcanica effusiva di un colore che varia dal grigio chiaro al marrone. Il porfido è formato da una pasta vetrosa o microcristallina di fondo, che ne costituisce più del 65%, nella quale sono immersi piccoli cristalli (dimensioni 2÷4 mm) in percentuale variabile tra il 30÷35%. I cristalli più abbondanti sono quelli di quarzo, feldspati e miche. Le cave per l'estrazione del porfido si trovano prevalentemente nella regione del Trentino Alto Adige e nelle zone dolomitiche. La densità degli aggregati basaltici risulta essere 2500÷2700 kg/m<sup>3</sup>. Gli inerti impiegati nella miscela bituminosa di Imola hanno un peso specifico pari a 2659 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.4.5. Aggregati calcarei

Il **calcare** è una roccia sedimentaria la cui composizione dipende dalle condizioni di formazione (chimica, organogena o clastica). Il componente principale è rappresentato

dal minerale calcite nel quale sono presenti impurità argillose o quarzitiche più o meno evidenti.

Le cave per l'estrazione del calcare si trovano prevalentemente lungo corsi d'acqua o laghi e, di conseguenza, si trovano distribuite più o meno in tutte le regioni italiane, compresa l'Emilia Romagna. La densità degli aggregati basaltici risulta essere  $2750\div 2900 \text{ kg/m}^3$ . Gli inerti impiegati nella miscela bituminosa di Monza hanno un peso specifico pari a  $2810 \text{ kg/m}^3$ .

## **2.5. Caratteristiche dei conglomerati bituminosi**

In questo paragrafo vengono esaminati i conglomerati bituminosi confezionati con i materiali descritti nel capitolo precedente. Come si può osservare sempre dalla tabella 2.1, le quattro miscele bituminose analizzate sono così composte:

- *Miscela di Prova*: confezionata con un bitume di tipo 70-100 e con aggregati basaltici;
- *Conglomerato bituminoso di Imola*: confezionato con un legante di tipo LOWAL HM40 e con aggregati di tipo porfirico;
- *Conglomerato bituminoso di Monza*: confezionato con un legante di tipo LOWAL HM40 e con aggregati calcarei;
- *Conglomerato bituminoso del Mugello*: confezionato con un legante di tipo LOWAL HM40 e con aggregati di tipo basaltico.

Si procede quindi ora con l'analizzare in maniera dettagliata le miscele sopra elencate.

### **2.5.1. Miscela di Prova**

Questo tipo di conglomerato bituminoso è stato confezionato direttamente in laboratorio utilizzando come legante il bitume 70-100 (impiegato nelle pavimentazioni stradali urbane) e aggregati basaltici aventi le stesse caratteristiche prestazionali di quelli della miscela bituminosa del Mugello. La percentuale di legante scelta per questo tipo di

conglomerato bituminoso è pari al 6,10% rispetto al peso degli inerti. La dimensione di quest'ultimi è stata scelta affinché la curva granulometrica stia all'interno del fuso definito dal capitolato.

<b>Miscela di Prova</b>		
Setaccio [mm]	Passante	Trattenuto
16	98,8	1,2
14	95,0	5,0
12,5	89,0	11,0
10	81,3	18,7
8	68,5	31,5
6,3	58,1	41,9
4	46,5	53,5
2	33,9	66,1
1	24,8	75,2
0,25	14,5	85,5
0,063	9,4	90,6

Tabella 2.2 – Analisi granulometrica per setacciatura Miscela di Prova

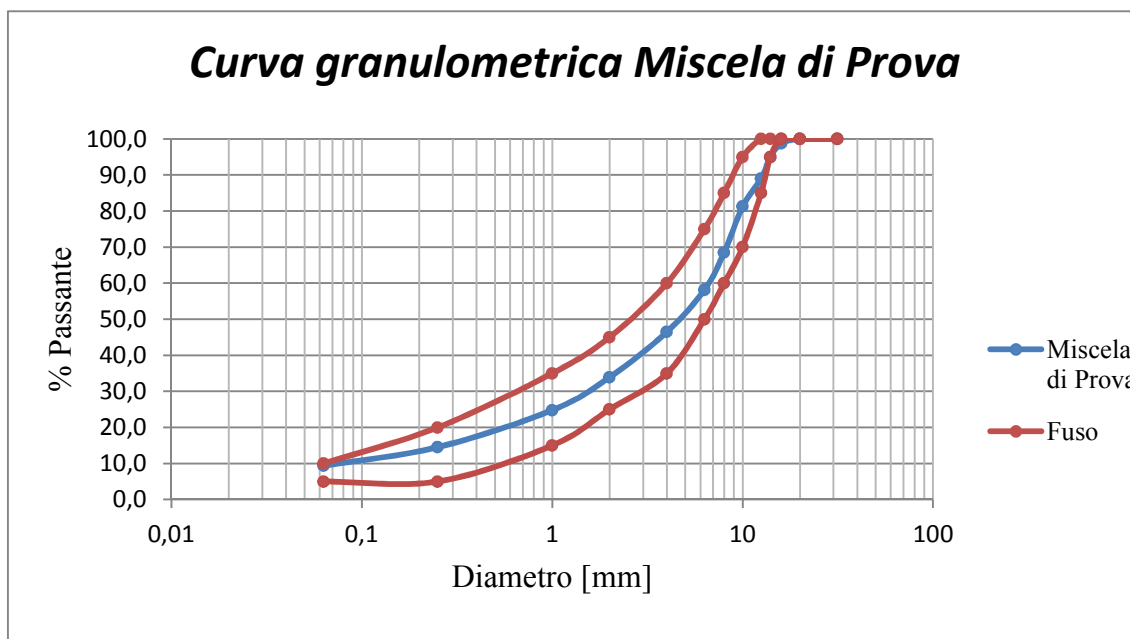


Figura 2.2 – Curva granulometrica Miscela di Prova

### 2.5.2. Imola

Il legante impiegato nel conglomerato bituminoso di Imola è sempre un bitume *LOWVAL HM40* e la sua percentuale in peso, rispetto a quella degli inerti, è del 6,04 %. Gli inerti sono invece di tipo porfirico e presentano una Los Angeles sotto il 20% e una MicroDeval sotto il 10. La granulometria degli aggregati, studiata sempre dalla ditta Valli Zabban, è stata descritta e rappresentata dalla tabella e immagine seguenti:

<b>Imola</b>		
Setaccio [mm]	Passante	Trattenuto
14	99,4	0,6
12,5	95,9	4,1
10	87,1	12,9
8	77,0	23,0
6,3	69,5	30,5
4	54,4	45,6
2	39,3	60,7
1	28,5	71,5
0,5	21,8	78,2
0,25	15,6	84,4
0,125	11,5	88,5
0,063	8,3	91,7

Tabella 2.3 – Analisi granulometrica per setacciatura Imola

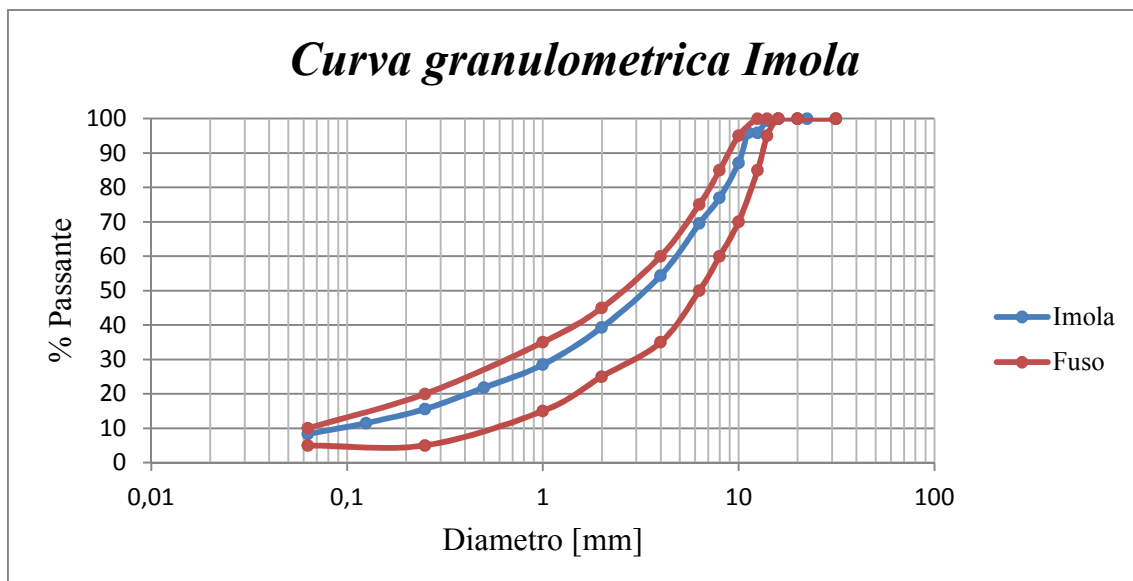


Figura 2.3 – Curva granulometrica Imola

La curva granulometrica è da considerarsi ottima in quanto risulta essere ben assortita.

Il peso specifico reale del conglomerato bituminoso risulta essere pari a 2405 kg/m<sup>3</sup>.<sup>[9]</sup>

### 2.5.3. Monza

Il legante impiegato nel conglomerato bituminoso di Monza è un bitume *LOWVAL HM40* e la sua percentuale in peso, rispetto a quella degli inerti, è del 6,32%. Gli inerti, il cui peso specifico è di 2793 kg/m<sup>3</sup>, sono di tipo calcareo e presentano una Los Angeles sotto il 20% e una MicroDeval sotto il 10. La granulometria degli aggregati, studiata dalla ditta Valli Zabban, è stata descritta e rappresentata dalla tabella e immagine seguenti:

<b>Monza</b>		
Setaccio [mm]	Passante	Trattenuto
12,5	97,7	2,3
10	95,6	4,4
8	93,1	6,9
6,3	82,5	17,5
4	59,4	40,6
2	42,7	57,3
1	30,2	69,8
0,5	21,1	78,9
0,25	14,4	85,6
0,125	8,8	91,2
0,063	5,2	94,8

*Tabella 2.4 – Analisi granulometrica per setacciatura Monza*

---

<sup>[9]</sup> *Rapporto analitico n° 100/2011 della ditta Valli Zabban*



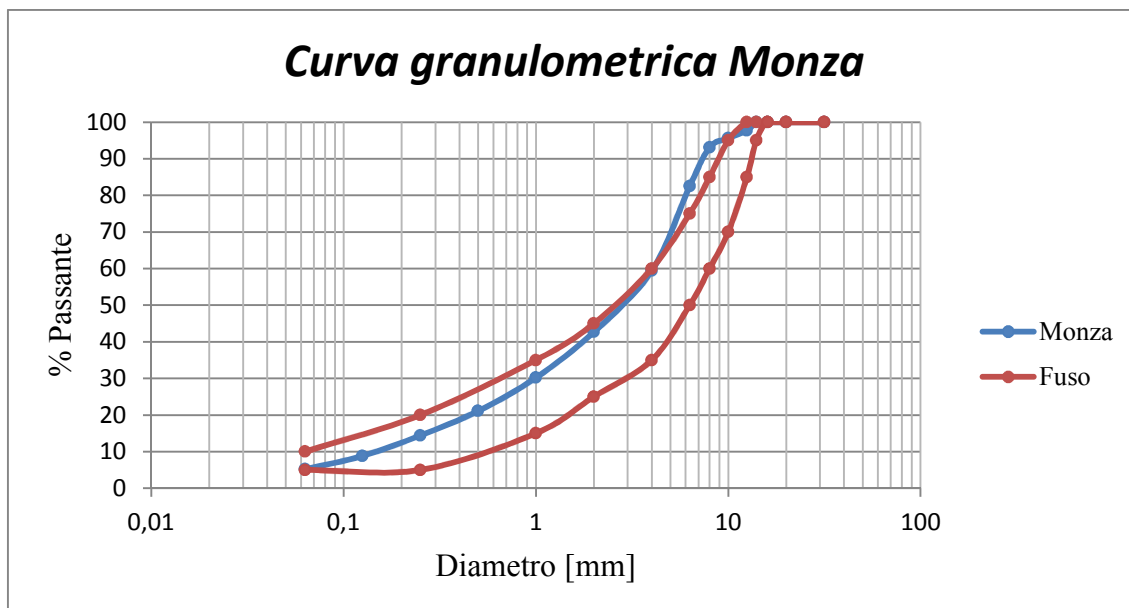


Figura 2.4 – Curva granulometrica Monza

La curva granulometrica, sebbene esca dal fuso per dimensioni degli aggregati maggiori a 5mm, è da considerarsi ottima in quanto risulta essere ben distesa e quindi assortita.

Il peso specifico reale del conglomerato bituminoso risulta essere pari a  $2535 \text{ kg/m}^3$ , mentre il peso di volume medio compattato pari a  $2481 \text{ kg/m}^3$ .<sup>[10]</sup>

#### 2.5.4. Mugello

I materiali impiegati per confezionare il conglomerato bituminoso del Mugello sono nuovamente il bitume *LOWVAL HM40* (avente una percentuale in peso pari al 6,20 % rispetto a quella degli inerti) ed aggregati basaltici. Quest'ultimi presentano una Los Angeles sotto il 20% ed una MicroDeval sotto il 10. La granulometria degli aggregati, anch'essa studiata dalla ditta Valli Zabban, è stata descritta e rappresentata dalla tabella e immagine seguenti:

<sup>[10]</sup> Rapporto analitico n° 56/2010 della ditta Valli Zabban

<b>Mugello</b>		
Setaccio [mm]	Passante	Trattenuto
14	93,4	6,6
12,5	87,2	12,8
10	76,5	23,5
8	68,2	31,8
6,3	61,0	39,0
4	47,6	52,4
2	33,4	66,6
1	23,4	76,6
0,25	13,5	86,5
0,063	7,9	92,1

Tabella 2.5 – Analisi granulometrica per setacciatura Mugello

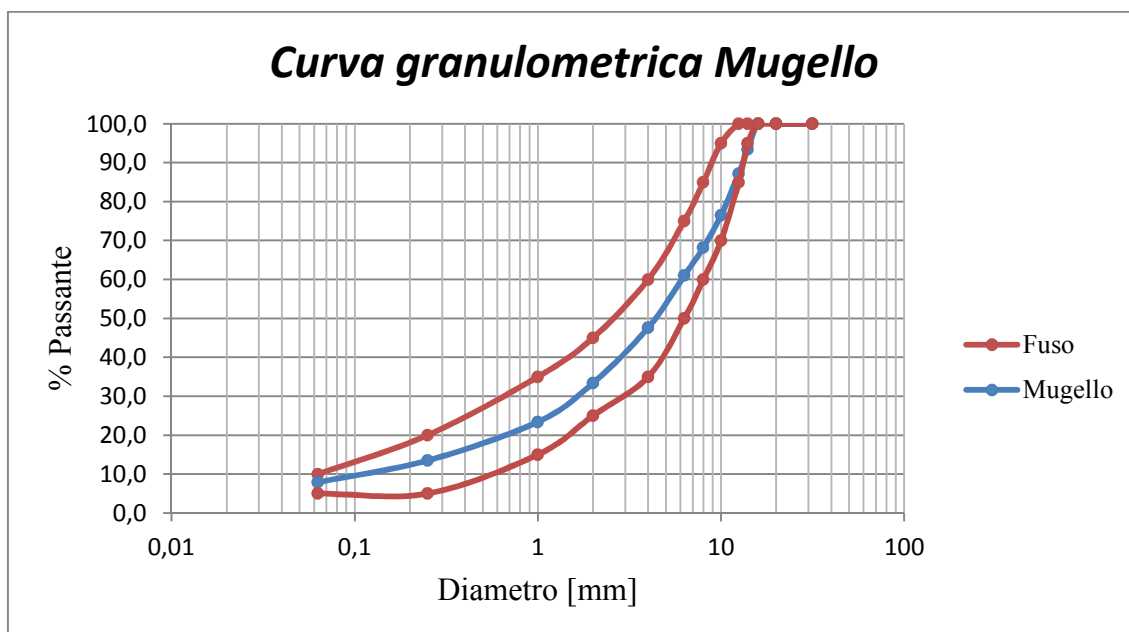


Figura 2.5 – Curva granulometrica Mugello

Anche in questo caso la curva granulometrica è da considerarsi ottima in quanto risulta essere perfettamente interna al fuso di capitolato.

Il peso specifico reale del conglomerato bituminoso risulta essere pari a  $2520 \text{ kg/m}^3$ .<sup>[11]</sup>

<sup>[11]</sup> Rapporto analitico n° 82/2011 della ditta Valli Zabban

## **2.6. Conclusioni**

In questo capitolo si è introdotto lo studio sperimentale che ha come finalità quella di analizzare le caratteristiche prestazionali dei conglomerati bituminosi dei circuiti automobilistici. Prima di effettuare test o prove sulle miscele, come visto, si sono analizzate, attraverso un'analisi separata delle qualità dei leganti e degli aggregati, le caratteristiche delle componenti che costituiscono i conglomerati bituminosi. Dopo questa prima fase, è stata analizzata la miscela nella sua totalità tramite lo studio della sua densità e delle caratteristiche granulometriche.

Tale studio si rivelerà fondamentale una volta conclusi i test, in quanto, con i risultati alla mano, si potrà capire come si comportino determinati aggregati o leganti confezionati in un conglomerato bituminoso sotto l'influsso di determinate sollecitazioni.

Studiate le caratteristiche dei materiali impiegati per confezionare le miscele analizzate, si procede, come illustrato nella Flow Chart in Figura 2.1, a compattare i conglomerati bituminosi in provini sopra i quali verranno effettuati i test.

I test saranno di due tipi, uno volumetrico e uno meccanico, indispensabili per studiare le caratteristiche intrinseche dei campioni e la loro risposta a determinate forze. Le procedure di compattazione e i test sono oggetto del capitolo seguente, denominato Metodologie di Prova; qui, tramite immagini, normative e formule, vengono descritte, passo per passo, le fasi percorse durante questa ricerca.



# Capitolo 3

## *Metodologie di Prova*





## Capitolo 3 - METODOLOGIE DI PROVA

### 3.1 Introduzione

Lo svolgimento di prove di laboratorio costituisce un tassello fondamentale nel campo della ricerca sperimentale soprattutto nel settore dell'ingegneria stradale. Difatti, tramite la compattazione e le prove di campioni provenienti da miscele bituminose, si riescono ad ottenere informazioni molto importanti sul comportamento che i conglomerati bituminosi analizzati assumeranno nella pavimentazione stradale, della quale, pertanto, si riescono a ricavare indicazioni circa la vita utile, la resistenza ed infine il possibile degrado.

Il conseguimento di risultati attendibili dipende molto dalla precisione e dall'attenzione impiegate durante lo svolgimento dei test. Una mancata accuratezza, infatti, conferisce ai provini analizzati e quindi ai rispettivi conglomerati bituminosi caratteristiche prestazionali non veritiere, portando così ad un'errata progettazione dell'intera pavimentazione stradale.

È quindi chiaro che per studiare le miscele bituminose occorre, oltre che una corretta scelta delle prove da effettuare per un'esatta analisi delle risposte del conglomerato bituminoso a determinate sollecitazioni, una grande precisione nello svolgimento dei test.

Nel seguente capitolo vengono esaminate nel dettaglio le prime 3 fasi presenti nella Flow Chart. Il primo procedimento consiste nel compattare in provini i conglomerati bituminosi dei diversi autodromi italiani attraverso tre metodi differenti. Ottenuti i campioni di laboratorio si sono quindi svolti su di essi delle prove necessarie a studiarne le caratteristiche qualitative e prestazioni. Poiché si vogliono approfondire le procedure e i test eseguiti in laboratorio senza avere una dettagliata analisi dei risultati, l'ultima fase di ricerca verrà analizzata nel 4° capitolo. Le fasi osservate sono quindi:

- **Metodi di compattazione:** vengono dettagliatamente esposti i metodi impiegati per la compattazione dei conglomerati bituminosi in sito e quelli utilizzati per la

preparazione dei provini in laboratorio. I secondi vengono poi analizzati in ordine cronologico, partendo quindi dalla compattazione mediante Marshall Compactor e Pressa Giratoria per arrivare a quella mediante Roller Compactor. Per ogni metodo viene esaminato il macchinario impiegato, il suo funzionamento e la procedura adottata, nel rispetto delle norme *UNI EN*.

- **Prove volumetriche:** ottenuti i provini mediante i differenti processi di compattazione, vengono esposte le prove volumetriche a cui essi sono stati sottoposti: tali prove sono impiegate per ottenere caratteristiche sulla densità (massa volumica massima e relativa) e sulla percentuale dei vuoti dei provini. Per ogni prova è stata descritta la relativa procedura e strumentazione al fine di ottenere risultati compatibili a quelli richiesti dalla normativa.
  
- **Prove meccaniche:** dopo aver compiuto le prove volumetriche, vengono quindi eseguite quelle meccaniche. I test svolti sono stati la prova ITSM e la Cantabro Loss Test atti a determinare rispettivamente la rigidità dinamica e la perdita di particelle dei provini. La prova Cantabro viene tenuta per ultima proprio per via della sua invasività che porta a compromettere definitivamente le caratteristiche del provino. Come per le due fasi sopra illustrate, oltre alla descrizione dei test vengono descritti i macchinari impiegati e la procedura seguita.

Si procede quindi ad analizzare dettagliatamente le fasi.

### **3.2 Fase I: Metodi di compattazione**

Per verificare le caratteristiche prestazionali dei conglomerati bituminosi degli autodromi italiani occorre analizzare alcuni campioni della miscela, prelevati durante la stesa. Questi devono essere compattati in provini sui quali verranno condotti, in laboratorio, test e prove al fine di studiarne le qualità. Si può quindi notare che la fase della compattazione sia un requisito indispensabile del programma sperimentale e deve essere compiuto correttamente per poter ottenere risultati veritieri.



Al giorno d'oggi, esistono tre metodi differenti per poter compattare in provini i conglomerati bituminosi: la compattazione mediante Marshall Compactor, quella mediante Pressa Giratoria ed infine quella mediante Roller Compactor. La scelta del metodo da utilizzare dipende dal test a cui si vuole sottoporre il provino, in quanto procedure di compattazione differenti conferiscono ai campioni caratteristiche volumetriche e prestazionali differenti.

Facendo un esempio, la compattazione Marshall, di tipo impulsivo, si presta per ottenere provini impiegabili soprattutto nei test volumetrici ma anche in alcune prove meccaniche (quale la Prova Cantabro).

La compattazione mediante pressa giratoria è molto utilizzata per studiare le caratteristiche volumetriche, la lavorabilità e l'addensabilità del conglomerato bituminoso analizzato.

Infine, tramite la compattazione mediante Roller Compactor, si riescono ad ottenere le stesse caratteristiche ottenibili mediante pressa giratoria, tuttavia tale metodo di compattazione riesce a simulare in maniera più efficiente la compattazione che subisce il conglomerato bituminoso in sito e i provini così ottenuti sono ottimi per essere poi carotati oppure per essere soggetti a test di fatica.

### **3.2.1 Compattazioni in Sito**

I conglomerati bituminosi, una volta stesi in sito, necessitano di un'accurata compattazione mediante appositi macchinari, al fine di ottenere una pavimentazione dal determinato grado di addensamento e dalle prestabilite qualità. Difatti, tramite il passaggio ripetuto e continuo dei macchinari, si riesce a conferire al conglomerato bituminoso appena steso determinate caratteristiche volumetriche (percentuale dei vuoti, densità, spessore della pavimentazione) e meccaniche (portanza, permeabilità della miscela). La temperatura alla quale bisogna compattare le miscele bituminose deve essere pari a quella di stesa ovvero tra i 130 e i 150°C per i conglomerati bituminosi tradizionali e tra i 150 e i 180°C per quelli dalle caratteristiche prestazionali maggiori. Le condizioni climatiche influenzano decisamente la qualità della compattazione, quindi

bisogna evitare nubi e in particolare piogge, in quanto abbassano nettamente la temperatura del conglomerato bituminoso e con essa la sua qualità di addensamento.

I macchinari impiegati sono i rulli compattatori che possono essere del tipo trainato o semovente. Si distinguono, in ordine di utilizzo, i seguenti rulli:

- A cilindri lisci
- A ruote pneumatiche
- A piastre vibranti
- A piedi di montone
- A ruote pneumatiche
- A griglia
- A ruote segmentate

Nel seguente elaborato verranno esposti solamente i tre macchinari più utilizzati, in quanto solamente questi vengono impiegati per la compattazione dei conglomerati bituminosi destinati ad autodromi e/o motodromi.

Il **compattatore a cilindri lisci** è un macchinario avente due cilindri zavorrabili (con acqua o sabbia) ed un telaio in acciaio. Queste caratteristiche conferiscono alla struttura una buona rigidità ed un baricentro molto basso, qualità indispensabili a garantire una maggiore stabilità e maneggevolezza. Questo tipo di veicolo, azionato da un motore diesel, viene impiegato, oltre che per la compattazione della pavimentazione stradale, anche per il costipamento di massicciate di ghiaia o pietrisco e di strati di base. Con il progredire della tecnologia, è stato brevettato un compattatore a cilindri lisci vibranti: le vibrazioni (1200 ÷ 1300 al minuto con ampiezze varianti da 0,8 a 2 metri) generano una forza di inerzia su ciascun granulo del materiale vibrato consentendo quindi ai granuli più piccoli di chiudere i vuoti lasciati dai più grandi riducendo così il volume complessivo con conseguente aumento della densità.

Per una corretta compattazione la velocità del rullo deve essere continua senza interruzioni: brusche sterzature o interruzioni produrrebbero danni irreversibili alla superficie della pavimentazione. Il macchinario deve passare su tutti i punti della pavimentazione più volte ma bisogna sottolineare che un dopo un certo numero di passaggi ogni azione del cilindro risulterebbe essere inutile se non dannosa: il rullo difatti romperebbe e polverizzerebbe le particelle di aggregato le cui superfici di rottura,

sprovviste di legante, si staccerebbero riducendo l'omogeneità del tappeto ed aumentando il problema del distacco degli aggregati illustrato nel primo capitolo.

Un aspetto da evidenziare consiste nel fatto che i rulli devono essere sempre bagnati da una soluzione leggermente insaponata al fine di evitare che il conglomerato bituminoso aderisca alla superficie del cilindro stesso.

Nella figura seguente si possono notare due compattatori impiegati per la compattazione del conglomerato bituminoso dell'autodromo di Monza svolti nell'estate del 2011.



Figura 3.1: Compattatore a cilindri lisci – Monza 2011

Il **compattatore a ruote pneumatiche** è invece costituito da un rimorchio a cassone zavorrabile ed ha la caratteristica di avere 8 ruote motrici gommate distanziate tra loro in maniera tale che il treno posteriore vada a costipare gli spazi lasciati dall'anteriore. La duplice azione di tale costipatore, verticale per effetto del carico e tangenziale per l'affondamento degli pneumatici, lo rende molto adatto per la compattazione delle terre fini e plastiche. Le caratteristiche che portano alla realizzazione di una buona compattazione mediante il compattatore a ruote pneumatiche sono la pressione di gonfiamento delle gomme e la loro area di contatto mentre il peso complessivo della macchina riveste un ruolo secondario. La velocità operativa e il carico vengono variati in funzione del tipo di conglomerato bituminoso da compattare e sovente i risultati migliori si ottengono con un carico medio e bassa velocità che evitano il mancato

costipamento in profondità. Le velocità usuali sono quindi 8÷12 km/h e la pressione delle gomme è 1,4÷2,5 atm.

Nella figura seguente si può notare un compattatore a ruote pneumatiche utilizzato durante la stesa del conglomerato bituminoso presso l'autodromo di Monza nel Luglio del 2011. Il suo ribaltamento in curva permette di evidenziare il numero e la disposizione delle ruote portanti.



Figura 3.2: Compattatore a ruote pneumatiche – Monza 2011

Il **compattatore a piastre vibranti** è un macchinario dal comportamento vibro-battente che si diversificano dai rulli vibranti per l'utilizzo di una forza premente che integra l'azione del vibratore per una resa maggiore. Questo macchinario si divide in due sottogruppi:

- La piastra vibrante, avente il motore montato sulla piastra che sollecita le masse vibranti che a loro volta provocano il movimento sussultorio della piastra: per via della sua dimensione ridotta è utilizzata dove altri costipatori non possono arrivare.
- La macchina a piastre vibranti multiple, viene montata su cingoli o gomme e utilizza sei piastre azionate idraulicamente. Questo macchinario è tuttavia poco utilizzato nei cantieri.

Nella figura seguente si può notare un esempio di compattatore a piastre vibranti impiegato in cantiere.



Figura 3.3: Compattatore a piastre vibranti

### 3.2.2 Compattazione Marshall

La compattazione Marshall è stata la prima procedura ad essere impiegata per compattare provini di conglomerato bituminoso in laboratorio. Questa modalità fu difatti inventata negli anni '60 e viene utilizzata tuttora. La procedura è di tipo impulsiva ed è quindi concettualmente diversa dall'addensamento che avviene durante la stesa in sito mediante rulli compattatori. Con tale modalità, il provino viene compattato mediante veri e propri colpi normati impressi da un apposito macchinario sulle facce di base. La normativa che descrive tale procedura è la *UNI EN 12697-30* e verrà ora illustrata la procedura da seguire per ottenere una buona compattazione partendo dalla preparazione del conglomerato bituminoso.

Per ogni provino bisogna preparare  $(1180 \pm 5)$ g di miscela che verrà poi posta in forno alla temperatura di  $180^{\circ} \text{C}$  per un periodo di almeno  $45 \div 60$  minuti.

Riscaldata la miscela, essa dovrà poi essere prelevata dal forno e posizionata all'interno di un apposito stampo (di diametro pari a 100mm e altezza pari a 50mm) che entrerà dentro il macchinario di compattazione Marshall rappresentato in figura:

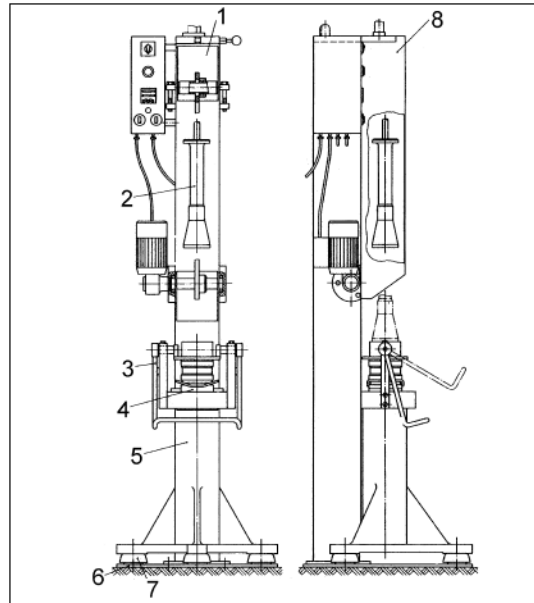


Figura 3.4: Compattatore Marshall

1: Apparato di base con motore di sollevamento per la massa scorrevole e conta-impatti

2: Martello compattatore con guida

3: Sistema di chiusura

4: Stampo di base

5: Base del compattatore

6: Base in acciaio

7: Piede

8: Schermatura

Posizionato quindi lo stampo all'interno del macchinario Marshall sopra la base del compattatore, si procede bloccandolo con un sistema di chiusura ad eccentricità indispensabile a garantire una compattazione centrata. Dopo aver verificato la corretta posizione dello stampo, si imposta l'apparato di base sbloccando la massa scorrevole e impostando il conta-impatti a 75 colpi. Al termine di questo procedimento, il macchinario è pronto per lavorare correttamente quindi, dopo aver azionato il dispositivo di sicurezza che avviene chiudendo la schermatura del macchinario, si può

procedere con la compattazione. L'apparato di base provvederà a far cadere il martello compattatore che impatterà con una forza nota sulla base del provino: l'intensità dell'impatto sarà dovuto al peso del martello ( $4550\pm 20\text{g}$ ), mentre la velocità con la quale esso colpirà il provino dipenderà dall'altezza da cui esso verrà fatto cadere ( $460\pm 5\text{mm}$ ). Al termine dell'impatto, tramite un motore di sollevamento, il martello verrà riportato nella posizione iniziale per poi essere lasciato di nuovo cadere. Il macchinario è stato impostato per fare cadere il grave con una cadenza di 1,1 secondi.

Al termine dei 75 colpi, si estrae il provino dalla macchina di compattazione Marshall e si ripete tutta la procedura facendo in modo tale che anche l'altra faccia del provino riceva lo stesso numero di colpi.

In questo modo, il martello impatterà in tutto 150 volte sul provino (75 per ogni faccia) portando ad una compattazione standardizzata.

Al termine della procedura, il provino verrà lasciato raffreddare per almeno 120 minuti fino al raggiungimento della temperatura ambiente. Solo a questo punto il campione potrà essere estratto dallo stampo di base mediante l'utilizzo di una pressa idraulica che imporrà al campione un cedimento monodirezionale senza deformazioni.

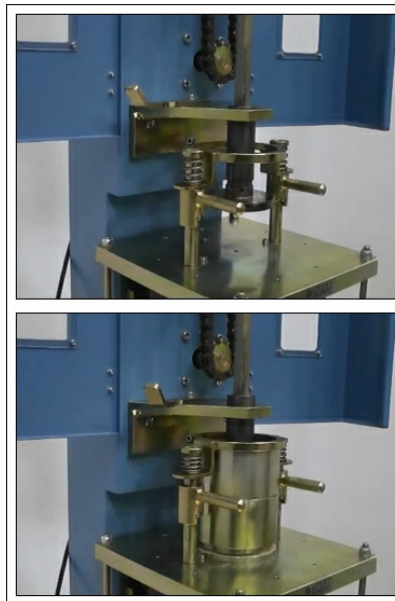


Figura 3.5: Particolari compattatrice Marshall

La riuscita di un buona compattazione dipende specialmente dai seguenti accorgimenti necessari a garantire la precisione del risultato:



1. Il provino deve rimanere in stufa solo per il tempo necessario a portarlo alla temperatura di compattazione (180°C). Il raggiungimento di una temperatura minore porterebbe ad un insufficiente addensamento durante la procedura e quindi un provino dalle qualità inferiori. Dall'altra parte, un riscaldamento eccessivo in stufa porterebbe ad un invecchiamento precoce della miscela bituminosa, compromettendo le sue caratteristiche prestazioni.
2. Una volta estratto il provino dalla stufa, bisogna avere l'accortezza di rimescolare accuratamente la miscela, in modo da evitare che gli aggregati più grossi (quali ghiaia/pietrisco), per effetto della gravità, si dispongano tutti nella parte inferiore dello stampo lasciando quelli fini (quali filler e sabbia fine) nella parte superiore. Il mancato mescolamento della miscela porta come risultato un provino avente caratteristiche discontinue lungo lo spessore.
3. Lo stampo contenente la miscela deve essere posto con precisione nella base del compattatore rispettando il sistema di chiusura ad eccentricità. Porre lo stampo in una posizione errata non solo rischia di portare ad una compattazione non omogenea sulla faccia del provino ma anche al rischio che il martello impatti sul bordo dello stampo con conseguenti danni per l'intera macchina Marshall. Nella figura seguente si può vedere quanto sopra detto.



*Figura 3.6: Posizionamento dello stampo nella base del compattatore con dispositivo di chiusura eccentrica*



4. Il tempo di compattazione di un provino deve essere relativamente breve, in modo tale che esso non si raffreddi all'interno della Marshall. In più, bisogna evitare che le temperature alle quali le due facce vengono compattate non siano troppo differenti in modo tale da garantire un addensamento costante ed uniforme in tutto il provino.
5. L'estrazione del provino dallo stampo deve essere fatta esclusivamente quando la temperatura registrata è pari a quella dell'ambiente. Solo in questo modo, la pressa idraulica impartirà al campione un cedimento privo di deformazioni mantenendo così le facce del provino parallele ed evitando schiacciamenti.

### **3.2.3 Pressa a taglio giratoria**

La ricerca di strumentazioni che simulassero il più possibile la compattazione in sito ha portato, tra gli anni '90 e il 2000, alla progettazione di un nuovo macchinario denominato SGC (Superpave Gyrotory Compactor o, in italiano, pressa a taglio giratoria). Questo strumento viene utilizzato per la compattazione dei conglomerati bituminosi e rende possibile lo studio delle caratteristiche volumetriche delle miscele. I provini realizzati mediante quest'apparecchiatura, seguendo la norma *UNI EN 12697-31*, possono poi essere sottoposti a test di caratterizzazione meccanica.

La strumentazione che compone la Pressa a taglio Giratoria (Figura 3.7) è in grado di esercitare sul materiale in modo simultaneo una pressione verticale e un moto rotatorio intorno ad un asse inclinato rispetto alla verticale.



Figura 3.7: Visione globale della Pressa Giratoria utilizzata per la sperimentazione

La combinazione di questi movimenti svolge un'azione impastante sul materiale, conferendogli un grado di addensamento che simula in modo soddisfacente quello eseguito in opera mediante rulli. Gli elementi che caratterizzano questo macchinario sono pressa, stampi e relativi coperchi:

- La Pressa Giratoria è in grado di realizzare provini compattati con una forza  $F$  costante mentre questi ruotano attorno ad un asse inclinato di un angolo  $\varphi = 1,25^\circ$  rispetto alla verticale.
- Gli stampi metallici (Figura 3.8), realizzati con materiale indeformabile non rugoso, possono avere un diametro di 100, 150 e 160 mm e altezza proporzionale alla quantità di materiale inserito nella fustella; lo spessore minimo è 7,5 mm. A circa 2 cm dalla base è presente un anello utile a sfruttare un sistema di ruote interno alla Pressa che garantisce agli stampi l'inclinazione e la rotazione richiesta.



Figura 3.8: Stampo metallico utilizzato per la compattazione con la Pressa Giratoria

- I coperchi metallici (Figura 3.9) vengono direttamente appoggiati sul materiale, la loro funzione è quella di distribuire la forza  $F$  di compattazione impressa dal pistone su tutta l'area del provino. Anch'essi devono essere realizzati con materiale poco sensibile alle elevate temperature.



Figura 3.9: Coperchio per lo stampo della Pressa Giratoria; dietro questo si può notare l'utensile magnetico utilizzato per il suo inserimento

Le caratteristiche del macchinario utilizzato in questo studio sono (Figura 3.10):

- Inclinazione di  $\varphi = 1,25^\circ \pm 0,02^\circ$  rispetto la verticale;
- 180 giri con velocità di rotazione pari a 30 giri/min;
- Pressione verticale costante di 600 kPa per la durata della compattazione;
- Provini cilindrici di 150 mm di diametro;

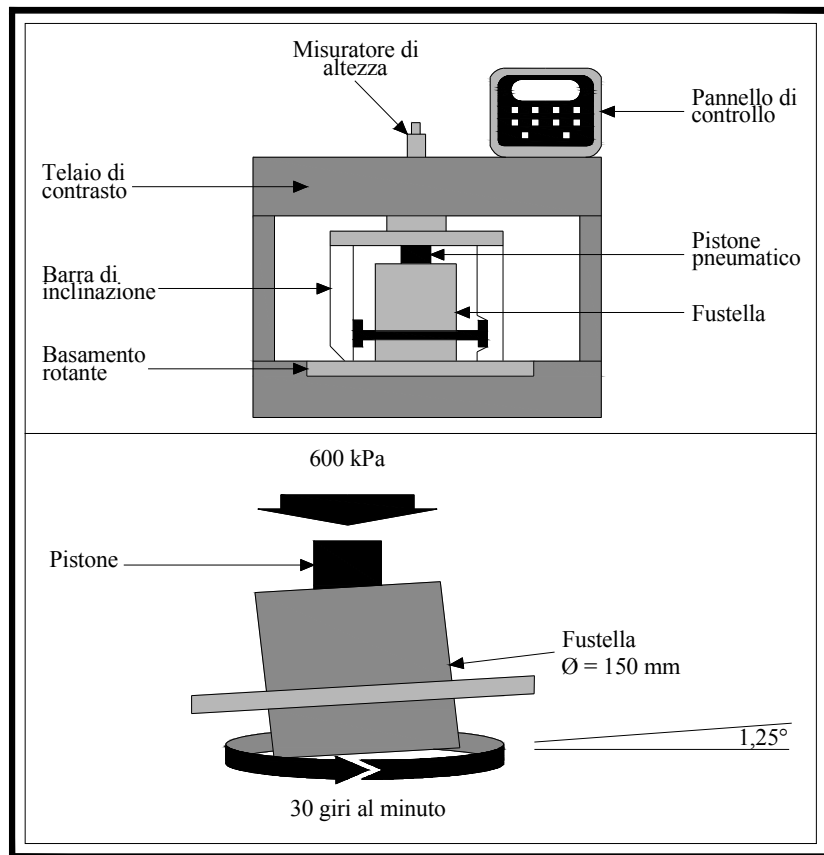


Figura 3.10: Schematizzazione del funzionamento della Pressa Giratoria utilizzata per lo studio

Nel corso della compattazione l'apparecchiatura registra su file i dati relativi ad ogni provino ed in particolare viene memorizzata l'altezza del campione per ogni corrispondente rotazione della fustella. L'elaborazione di questi parametri consente di valutare importanti caratteristiche volumetriche del conglomerato, quali i vuoti nell'aggregato lapideo, i vuoti riempiti d'aria ed i vuoti riempiti di bitume. L'abbassamento dell'altezza del conglomerato contenuto nella fustella nel corso della compattazione consente di disegnare le curve d'addensamento del materiale in funzione del numero di giri compiuti. La rappresentazione avviene attraverso grafici (Figura 3.11, 3.12) che riportano in ascissa il numero di giri compiuti dalla fustella (in scala logaritmica) ed in ordinata la percentuale di densità massima teorica raggiunta e la percentuale dei vuoti.

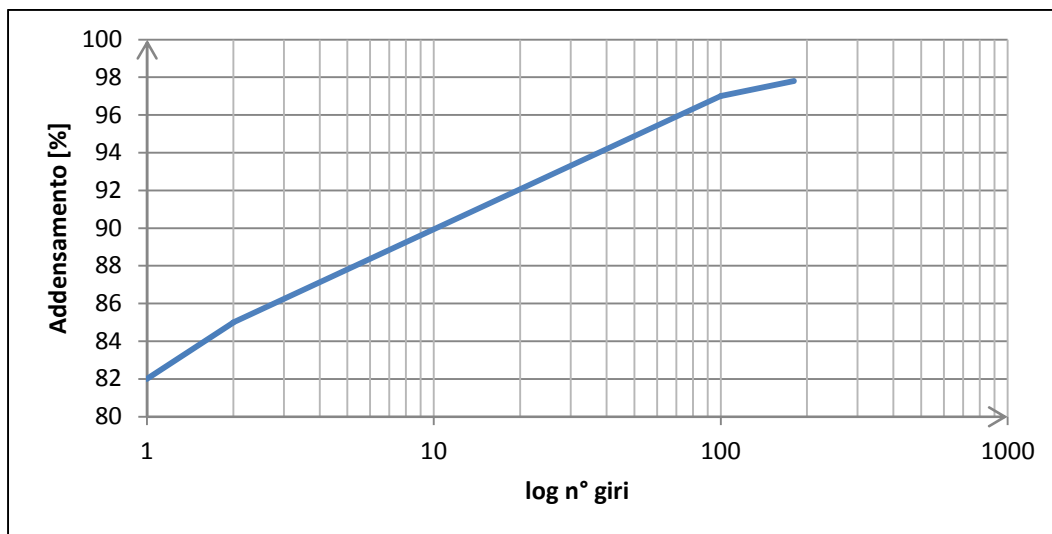


Figura 3.11: Curva d'addensamento

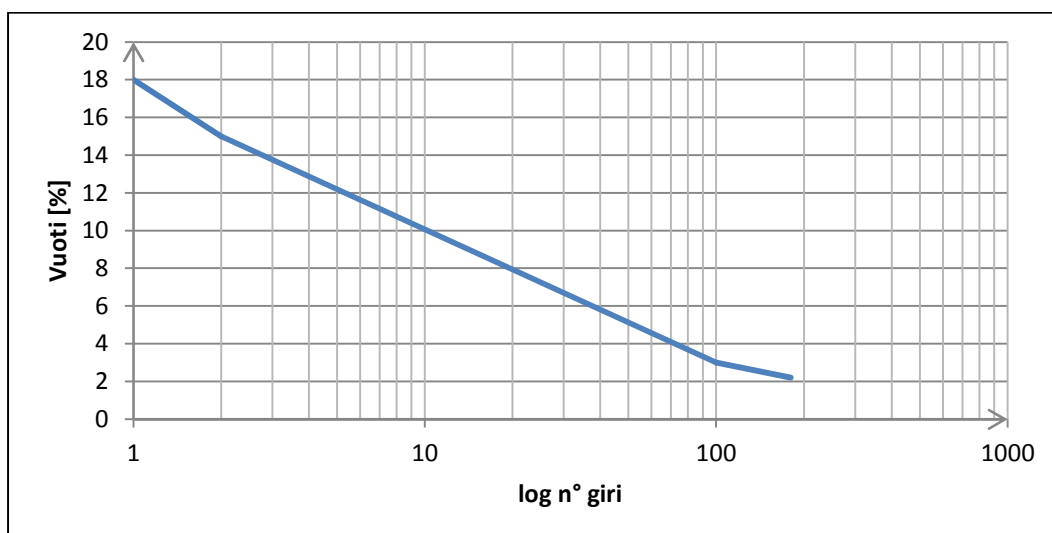


Figura 3.12: Curva percentuale dei vuoti

Analizzando i grafici si può notare una parte iniziale nella quale emerge una proporzionalità fra il grado di compattazione e numero di giri effettuati dalla pressa, mentre oltrepassato un certo numero di rotazioni, la curva cambia pendenza e tende ad un asintoto orizzontale. Questo comportamento è giustificato dal fatto che una volta raggiunta una configurazione prossima a quella di riorganizzazione massima delle particelle interne, le rotazioni successive divengono sempre meno influenti riguardo al grado di addensamento. Da risultati sperimentali si è riscontrato che il numero di giri che porta ad una percentuale d'addensamento massima può essere approssimato a 100 rotazioni.

I parametri di compattazione sono legati dalla relazione:

$$G_{mm}(\%) = G_{mm_1}(\%) + K[\log(N)] \quad [3.1]$$

Dove:

$G_{mm_1}$  = addensamento al compimento del primo giro;

$K$  = coeff. angolare della curva di addensamento;

$N$  = numero di giri compiuti dalla fustella.

Dall'andamento delle curve di compattazione è possibile valutare l'attitudine dei conglomerati alla lavorabilità e compattazione. Pendenze elevate e bassi valori della densità iniziale sono indici caratteristici di una miscela dotata di buona lavorabilità ed elevata addensabilità.

Il processo di compattazione può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- *preparazione degli inerti secondo la curva granulometrica di riferimento (Figura 3.13);*
- *disposizione degli aggregati su una teglia ed aggiunta del bitume necessario (6% sul peso totale degli inerti);*
- *preventiva miscelazione manuale delle componenti prestando attenzione a mantenere una temperatura pari a  $T_{work}$ ;*
- *condizionamento in stufa per 45 minuti (Figura 3.14) alla temperatura di lavorabilità  $T_{work}$ );*



Figura 3.13: Aggregati lapidei per conglomerato bituminoso



Figura 3.14: Teglie all'interno del forno

- miscelazione meccanica mediante apposita apparecchiatura (Figura 3.15) alla temperatura di lavorabilità per un tempo di 60 secondi;





Figura 3.15: Apparecchiatura per la miscelazione

➤ *travaso del materiale ottenuto all'interno delle fustelle (Figura 3.16);*



Figura 3.16: Riempimento fustelle



- una volta posti all'interno delle fustelle, i conglomerati sono stati sottoposti ad un periodo di condizionamento in forno alla temperatura  $T_{work}$  per un tempo di 15 minuti;
- compattazione mediante pressa a taglio giratoria ad una pressione di 600 kPa per 180 giri.

Il mantenimento della corretta temperatura ( $T_{work}$ ) durante la suddetta procedura risulta essere il punto critico in questa fase. Allo scopo di ridurne al minimo le variazioni, questa è stata continuamente monitorata grazie all'impiego di un termometro laser (Figura 3.17).



Figura 3.17: Monitoraggio temperatura

La verifica che accerti se il conglomerato bituminoso in sito presenti una buona lavorabilità ed un'addensabilità omogenea viene effettuata tramite la termocamera.

La termocamera che viene impiegata, una FLIR P660 HR, è una particolare telecamera sensibile alla radiazione infrarossa e capace di ottenere immagini o riprese termografiche.



*Figura 3.18: Termocamera FLIR P660 HR*

A partire dalla radiazione rilevata, tramite un apposito software interno al macchinario, si ottengono dunque delle mappe di temperatura delle superfici fotografate. Colori simili indicano zone aventi temperature simili e si può impostare una scala di colori in modo tale da avere nella fotografia scattata la gradazione della temperature voluta.

La termocamera viene molto impiegata come verifica durante la stesura dei conglomerati bituminosi in quanto mostra la temperatura di applicazione e di compattazione dei conglomerati bituminosi. Maggiore è l'addensabilità della miscela, più omogenea sarà, durante la stesa, la sua temperatura e la sua compattazione.

Un esempio di quanto detto è osservabile nella figura 3.19: la buona addensabilità del conglomerato bituminoso di Monza ha permesso di scattare una foto termica dai colori omogenei e costanti. Grandi variazioni di colore avrebbero significato compattazioni disomogenee lungo il circuito.



Figura 3.19: Foto termica durante la stesura del conglomerato bituminoso a Monza

### 3.2.4 Roller Compactor

Con il progredire della ricerca, nel 2000 si è ottenuto un ulteriore metodo di compattazione denominato Roller Compactor che affiancava quelli già precedentemente impiegati ovvero Marshall Compactor e SGC. Questo nuovo metodo di compattazione si basa su un tipo di macchinario che riproduce il lavoro svolto dai veicoli utilizzati in sito e, di conseguenza, i risultati conseguiti con il Roller Compactor si possono ritenere molto vicini a quelli ottenuti in sito in termini di grado di addensamento, spessore e percentuale dei vuoti. Il risultato che si ottiene da tale compattazione è un provino denominato “slab” avente due dimensioni nettamente superiori alla terza. Tale “slab” può poi venire carotata per ottenere provini cilindrici oppure sottoposta direttamente a test meccanici quali la rottura a fatica.

È utile sottolineare che esistono differenti macchinari di Roller Compactor ognuno dei quali simula il comportamento di un differente compattatore impiegato in sito.

La normativa prescrive l'utilizzo di solo 3 di questi modelli che verranno quindi ora analizzati:

➤ **Smooth Steel Roller** è un macchinario che simula il comportamento del compattatore a cilindri lisci impiegato in sito evidenziato nel capitolo 3.1.1.

Tale strumento di laboratorio compatta i provini tramite un cilindro caricato da una determinata forza  $F$  che scorre sul provino al fine di compattarlo. La forza può venire incrementata o diminuita in modo da poter variare la percentuale dei vuoti e l'altezza finale della "slab".

È necessario sottolineare che tra il rullo e la "slab" bisogna spruzzare continuamente una soluzione leggermente insaponata al fine di evitare che il conglomerato bituminoso aderisca alla superficie del cilindro stesso. Per una corretta compattazione la velocità del rullo deve essere continua senza interruzioni: brusche sterzature o interruzioni produrrebbero danni irreversibili alla superficie della "slab". Al tempo stesso la cilindratura deve essere iniziata dai lati procedendo verso il centro e non deve essere prolungata oltre in necessario: dopo un certo numero di passaggi ogni azione del cilindro risulterebbe essere inutile se non dannosa. Il rullo difatti romperebbe e polverizzerebbe le particelle di aggregato le cui superfici di rottura, sprovviste di legante, si staccerebbero riducendo l'omogeneità del tappeto.

La procedura da seguire è descritta dettagliatamente dalla norma *UNI EN 12697-33* che ha stilato delle apposite tabelle che descrivono come impostare il macchinario affinché si ottengano i risultati aspettati.



Figura 3.20: Compattatore Smooth Steel Roller

➤ **Wheel Compactor** è invece un macchinario da laboratorio che simula il comportamento del compattatore a ruote pneumatiche impiegato in sito.

Sebbene in sito le ruote sono 8, il dispositivo usato in laboratorio è dotato di una o al più due ruote gommate che si devono muovere sul campione a velocità costante.

Il numero di ruote dipende dalle dimensioni che si vogliono ottenere dalla slab:

- 1 Ruota per slab aventi dimensioni pari a 500 x 180 mm,
- 2 Ruote per slab aventi dimensioni pari a 600 x 400 mm

La velocità invece per normativa deve essere compresa tra i 200 mm/s e i 500 mm/s con un margine d'errore pari al 10% ed il carico  $F$  applicato alle ruote deve essere inversamente proporzionale allo spessore e alla percentuale dei vuoti che si vuole ottenere per la slab. Il passaggio ripetuto e continuo su ogni punto del campione e la corretta pressione di gonfiaggio della/e gomma/e portano ad una compattazione uniforme ed omogenea. La procedura da seguire è descritta dettagliatamente dalla norma *UNI EN 12697-33* ed in seguito verrà riportata un'immagine utile a comprendere meglio quanto sopra detto.



Figura 3.21: Compattatore Wheel Compactor

➤ Infine, il terzo macchinario utilizzato per la compattazione di provini in laboratorio è il **sliding steel plates** che riproduce con fedeltà il compattatore a piastre vibranti impiegato in sito. Tale macchinario viene utilizzato solo per la preparazione di

provini che devono avere densità o percentuali dei vuoti specifiche. Le piastre devono essere inizialmente scaldate assieme allo stampo contenente il conglomerato bituminoso e successivamente devono essere poste in posizione verticale a stretto contatto con questo. Una volta impostato il carico voluto  $F$ , si può far partire la vibrazione delle piastre che terminerà solamente dopo aver raggiunto la densità voluta. La normativa che descrive tale metodo è sempre la *UNI EN 12697-33* ed in seguito si potrà notare in figura un esempio di sliding steel plates impiegato nei laboratori.



Figura 3.22: Compattatore Sliding Steel Plates

Qualunque sia il metodo di compattazione scelto per preparare i provini, la massa di conglomerato bituminoso necessaria per ottenere una slab dalle dimensioni  $a \times b \times c$  si ricava dalla seguente formula:

$$M = 10^{-6} \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \rho_m \cdot \left( \frac{100 - v}{100} \right) \quad [3.2]$$

$M$  = massa di conglomerato bituminoso necessaria per la compattazione della slab [kg]

$a, b, c$  = dimensioni della slab volute [mm]

$\rho_m$  = massa volumica massima del conglomerato bituminoso [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = percentuale dei vuoti della slab [%]

### 3.3 Fase II: Test di caratterizzazione volumetrica

Eseguiti i vari metodi di compattazione, si sono quindi svolti i test volumetrici utili a studiare le differenze di densità tra i conglomerati bituminosi provenienti dai diversi autodromi italiani. Un altro ulteriore aspetto che si è cercato di evidenziare con tali test è stato come il metodo di compattazione potesse influenzare sulle caratteristiche volumetriche dei provini. Difatti, come si è poi rilevato, metodi di compattazione differenti portano a diversi gradi di addensamento conferendo così ai provini caratteristiche qualitative differenti.

I test volumetrici sono indirizzati a studiare la densità e la percentuale dei vuoti dei provini ricavati dai vari conglomerati bituminosi. Poiché i risultati ottenuti sono aleatori, tramite una media ponderata dei vari risultati si possono ottenere le caratteristiche intrinseche delle miscele bituminose analizzate. Si procede quindi ora ad illustrare i tre differenti test svolti in laboratorio per lo studio delle pavimentazioni provenienti da autodromi:

- La **densità massima** dei provini (caratteristica che non dipende dal metodo di compattazione ma solo dalle caratteristiche dei leganti e degli aggregati) viene determinata dallo studio del conglomerato bituminoso non ancora compattato attraverso pesate in acqua ed in aria. Al termine della prova, il conglomerato bituminoso utilizzato potrà poi venir compattato per confezionare nuovi campioni.
- La **densità apparente** dei provini (che dipende anche dal metodo di compattazione) viene studiata tramite opportune pesate dei provini in acqua e in aria. La scelta di utilizzare determinati accorgimenti durante le pesate (quali la scelta del parafilm rispetto alla paraffina) fanno sì che il provino possa continuare ad essere utilizzato anche nei test successivi in quanto non vengono intaccate le sue caratteristiche fisiche.



- La determinazione della *percentuale dei vuoti* si ottiene per via analitica, ricavando il risultato dallo studio delle due densità sopra enunciate. Tale prova ovviamente non avvenendo sul provino non ne altera le proprietà.

### 3.3.1. Massa volumica Massima

La *massa volumica massima* di una miscela bituminosa corrisponde alla massa per volume unitario, al netto dei vuoti d'aria, ad una fissata temperatura. Le procedure per la sua determinazione sono regolate dalla norma *UNI EN 12697-5*. Questa grandezza, combinata alla massa volumica apparente, consente, come detto, di determinare la percentuale di vuoti presenti in un conglomerato bituminoso. La prova prevede un periodo di essiccamento in forno alla temperatura di  $110 \pm 5$  °C dopodiché il materiale deve essere separato in granuli di dimensioni non superiori a 6 mm. I procedimenti per la determinazione della massa volumica massima sono tre:

- *volumetrico,*
- *idrostatico,*
- *matematico.*

Il primo procedimento si articola nelle seguenti operazioni:

- *pesare il picnometro vuoto (compreso il coperchio) (Figura 3.23) di volume noto  $V_p$  ottenendo così la massa  $m_1$ ;*



Figura 3.23: Strumentazione per la determinazione della densità



- *collocare il provino essiccato nel picnometro e portarlo a temperatura ambiente, quindi pesarlo nuovamente, assieme al coperchio ( $m_2$ );*
- *riempire il picnometro con acqua, fino ad un massimo di 30 mm al di sotto del giunto della testa;*
- *far fuoriuscire l'aria intrappolata, creando una depressione parziale pari a 4 kPa per  $15 \pm 1$  minuti;*
- *fissare la testa e riempire con attenzione il picnometro con acqua fino al segno di riferimento presente sulla testa del picnometro;*
- *collocare il picnometro in un bagno d'acqua alla temperatura di prova per almeno 30 minuti;*
- *estrarre il picnometro dal bagno d'acqua, asciugare l'esterno e pesarlo immediatamente ( $m_3$ ).*

La formula per il calcolo della densità massima con il procedimento volumetrico si traduce in:

$$\rho_{mv} = \frac{m_1 - m_2}{1000 \cdot V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w} \quad [3.3]$$

dove:

$m_1, m_2, m_3 =$  masse [g]

$V_p =$  volume del picnometro (noto dal certificato di calibrazione) [ $m^3$ ]

$\rho_w =$  massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [ $kg/m^3$ ]

**Il procedimento idrostatico** è quello adottato nel presente studio e si articola nelle seguenti operazioni:

- *determinare la massa del contenitore vuoto in aria ( $m_1$ ), e pieno d'acqua ( $m_2$ );*
- *collocare il materiale nel contenitore asciutto e portarlo a temperatura ambiente, quindi determinare la massa del contenitore più quella del provino in aria ( $m_3$ );*
- *riempire il contenitore con acqua e far fuoriuscire l'aria intrappolata sfruttando una depressione impressa da un'apposita apparecchiatura (Figura 3.24);*



Figura 3.24: Strumentazione per sottoporre il provino a depressione

- collocare il contenitore nel bagno d'acqua a temperatura costante (compresa tra 20 e 30 °C) per almeno 30 minuti;
- determinare la massa del contenitore al cui interno sono presenti provino e acqua ( $m_4$ ).

In questo caso la formula per il calcolo della densità massima è la seguente:

$$\rho_{mh} = \frac{m_3 - m_2}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} \cdot \rho_w \quad [3.4]$$

dove:

$m_1, m_2, m_3, m_4 =$  masse [g]

$\rho_w =$  massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova [kg/m<sup>3</sup>]

Il procedimento matematico, infine, consiste nel quantificare le componenti della miscela come percentuale sul totale. L'utilizzo del procedimento matematico prevede quindi la conoscenza della composizione della miscela, perciò se il contenuto di legante presente non è noto, occorre provvedere alla sua determinazione tramite le prescrizioni presenti nella norma *UNI EN 12697-1*. La densità degli aggregati deve essere calcolata in conformità alla normativa *UNI EN 1097-6* mentre il calcolo di quella del legante deve seguire le prescrizioni presenti nella norma *EN ISO 3838*.

L'espressione utilizzata è:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{p_a}{\rho_a}\right) + \left(\frac{p_b}{\rho_b}\right)} \quad [3.5]$$

dove:

$p_a$  = percentuale di aggregati nella miscela

$p_b$  = percentuale di legante nella miscela

$\rho_a$  = massa volumica apparente degli aggregati

$\rho_b$  = massa volumica apparente del legante a 25°C

### 3.3.2. Massa volumica Apparente

La massa volumica apparente corrisponde alla massa per unità di volume, al lordo dei vuoti d'aria, di un provino compattato in laboratorio o ricavato da carote estratte dalla pavimentazione. Le procedure per la sua determinazione sono descritte dalla norma *UNI EN 12697-6*. La scelta della procedura di prova dipende dal contenuto di vuoti stimato per il provino e dalla loro accessibilità. Si distinguono le seguenti procedure:

- *massa volumica apparente secca*, per provini con una superficie molto densa;
- *con superficie satura asciutta*, per provini con una superficie densa;
- *con provino sigillato*, per provini con una superficie porosa;
- *massa volumica apparente geometrica*, per provini con superficie regolare e di forma geometrica

Le prime tre modalità di prova prevedono pesate in aria e calcolo del volume tramite pesate in acqua (Principio di Archimede). La procedura geometrica, invece, sfrutta la geometria nota del provino per calcolarne il volume.

La massa volumica apparente secca si determina nel seguente modo:

- *determinare la massa del provino secco tramite pesata in aria ( $m_1$ );*
- *misurare la temperatura del bagno d'acqua*
- *determinare la massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (Tabella 3.01) ;*

<b>Massa Volumica Acqua</b>					
Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione K	Massa volumica dell'acqua kg/m <sup>3</sup>
10	1,0027	999,8	20	1,0012	998,3
11	1,0026	999,7	21	1,0010	998,1
12	1,0025	999,6	22	1,0007	997,8
13	1,0023	999,4	23	1,0005	997,6
14	1,0022	999,3	24	1,0003	997,4
15	1,0021	999,2	25	1,0000	997,1
16	1,0019	999,0	26	0,9997	996,8
17	1,0017	998,8	27	0,9995	996,6
18	1,0016	998,7	28	0,9992	996,3
19	1,0014	998,5	29	0,9989	996,0
20	1,0012	998,3	30	0,9986	995,7

Tabella 3.1: Schematizzazione valori massa volumica dell'acqua

- immergere il provino nel bagno d'acqua e fermare le oscillazioni della bilancia bloccando delicatamente il provino con una mano;
- leggere il valore della massa del provino subito dopo che l'acqua si è quietata dopo l'immersione ( $m_2$ ).

Questa procedura è adatta per conglomerati bituminosi molto densi, lisci, sostanzialmente non assorbenti. È una procedura molto veloce, facile e particolarmente conveniente per la maggior parte dei provini chiusi preparati nei laboratori.

L'espressione utilizzata per il calcolo della massa volumica apparente secca è la seguente:

$$\rho_{b \text{ dry}} = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \cdot \rho_w \quad [3.6]$$

dove:

$m_1, m_2 =$  masse espresse [g],

$\rho_w =$  massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

Il procedimento per la determinazione della massa volumica apparente con superficie satura asciutta si differenzia dalla modalità secca per la permanenza, successiva alla pesata, del provino nel bagno d'acqua affinché venga saturato. Il procedimento rimane

tale fino all'immersione del provino in acqua; da questo momento il campione deve rimanere immerso per almeno 30 minuti alla temperatura di prova. I due passi successivi (che non si effettuano nella procedura secca) sono:

- *determinare la massa del provino saturo ( $m_2$ ) mentre è ancora immerso, facendo attenzione che non vi siano bolle d'aria aderenti alla superficie o che fuoriescano dal provino durante la pesata;*
- *rimuovere il provino dall'acqua, asciugare velocemente le gocce sulla superficie utilizzando una pelle di camoscio umida;*
- *determinare la massa in aria del provino saturo, subito dopo averne asciugato la superficie ( $m_3$ ).*

Questa modalità di prova è applicabile a provini bituminosi chiusi con un basso livello di assorbimento di acqua o con lento drenaggio di quella assorbita. Si può utilizzare per materiali con contenuto di vuoti inferiore al 5%.

La formula per il calcolo della massa volumica apparente con superficie satura asciutta, utilizzata anche nel presente studio, è la seguente:

$$\rho_{b\ ssd} = \frac{m_1}{(m_3 - m_2)} \cdot \rho_w \quad [3.7]$$

dove:

$m_1, m_2, m_3 =$  masse espresse [g],

$\rho_w =$  massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

La procedura con provino sigillato, invece, è simile a quella con superficie secca, con la differenza che il provino viene preventivamente sigillato in modo che i vuoti interni non siano riempiti d'acqua. Dopo la determinazione della massa del provino secco si procede nel seguente modo:

- *sciogliere la paraffina portandola alla sua temperatura di fusione +10 °C e mantenendo tale temperatura con massima variazione di  $\pm 5$  °C;*
- *immergere il provino parzialmente nella paraffina per almeno 5 secondi;*
- *determinare la massa del provino asciutto sigillato ( $m_2$ );*
- *immergere il provino nel bagno d'acqua (che deve essere alla temperatura di prova);*
- *determinare la massa del provino sigillato immerso in acqua ( $m_3$ ).*

La formula per il calcolo della massa volumica apparente con provino sigillato è:

$$\rho_{b\ sea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)} \quad [3.8]$$

dove:

$\rho_{sm}$  = massa volumica del materiale sigillante alla temperatura di prova,

$m_1, m_2, m_3$  = masse espresse [g],

$\rho_w$  = massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova.

Infine, se si utilizza il procedimento geometrico, basta determinare la massa del provino a secco ( $m_1$ ) e misurarne le dimensioni. La formula in questo caso presenta due espressioni diverse. Per i provini cilindrici:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} h d^2} \cdot 10^6 \quad [3.9]$$

dove:

$h$  = altezza del provino [mm],

$d$  = diametro provino [mm],

$m_1$  = massa [g].

Per provini rettangolari:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{hlw} \cdot 10^3 \quad [3.10]$$

dove:

$l$  = lunghezza del provino [mm],

$w$  = larghezza del provino [mm],

$h$  = altezza del provino [mm],

$m_1$  = massa [g].

Le masse volumiche apparenti dei materiali oggetto del presente studio, sono state calcolate tramite il **procedimento con superficie satura asciutta**.

### 3.3.3. Percentuale dei Vuoti

La determinazione della *massa volumica massima* e *massa volumica apparente* hanno lo scopo di portare alla definizione della *percentuale dei vuoti d'aria* presenti all'interno del campione. La normativa di riferimento è la *UNI EN 12697-8*.

La percentuale del contenuto di vuoti d'aria, che rappresenta il rapporto percentuale tra il volume dei vuoti intergranulari ed il volume totale del conglomerato bituminoso (bitume più aggregati più volume dei vuoti) è calcolato con riferimento alla seguente formula:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100 \quad [3.11]$$

dove:

$\rho_m$  = *massa volumica massima della miscela*,

$\rho_b$  = *massa volumica apparente*.

Un elevato valore della percentuale dei vuoti sottolinea come il provino analizzato abbia i valori della massa volumica massima ed apparente molto differenti simbolo di una miscela contenente un elevato numero di interstizi. Un'alta percentuale dei vuoti è simbolo di una cattiva scelta dei materiali o una errata compattazione. Difatti la scelta di una granulometria non distribuita fa sì che gli interstizi lasciati dagli aggregati grossi non vengano riempiti da quelli fini ma dall'aria che ivi rimane intrappolata. Oltre alla scelta degli aggregati, influisce sul risultato anche quella del legante: difatti è verificabile in laboratorio che bitumi dalle elevate caratteristiche prestazionali conferiscono al conglomerato bituminoso una percentuale dei vuoti minore.

Anche un errata compattazione porta alla preparazione di un provino avente un elevato numero di interstizi: l'errata temperatura di compattazione e il mancato rispetto delle procedure richieste dalle normative sono fattori determinati che influiscono sulle caratteristiche volumetriche e quindi meccaniche dei provini.

La percentuale dei vuoti totali di un conglomerato bituminoso sarà ottenuta effettuando la media dei valori raggiunti per ogni singolo provino. Minore è la varianza dei valori, maggiore sarà la precisione del risultato.

### 3.4 Fase III: Test di Caratterizzazione Meccanica

Tramite i test meccanici, si è studiato come un provino risponda a determinate sollecitazioni. Il comportamento dei conglomerati bituminosi a questi test non dipende solo dai materiali impiegati per il confezionamento, ma anche dai metodi di compattazione e di conseguenza dalle caratteristiche volumetriche. Difatti, come si potrà notare nel capitolo sull'analisi dei risultati, provini ricavati dalla stessa miscela bituminosa ma compattati in maniera differente, rispondono alle forze applicate nei test in maniera differente, portando così risultati molto dissimili. Alcune di queste prove risultano essere invasive e deteriorano completamente il provino e di conseguenza andranno effettuate per ultime.

I test meccanici sono indirizzati a studiare il modulo di rigidezza e la perdita in peso dei vuoti dei vari provini ricavati dai vari conglomerati bituminosi. Poiché i risultati ottenuti sono aleatori, tramite una media ponderata dei vari risultati si possono ottenere le caratteristiche prestazionali delle miscele bituminose analizzate. Si procede quindi ora ad illustrare i due differenti test svolti in laboratorio per lo studio delle pavimentazioni provenienti da autodromi:

- Il **modulo di rigidezza dinamico**: tale test viene effettuato mediante l'utilizzo di un apposito macchinario denominato *IPC MATTA*. Esso determina, tramite lo studio delle deformazioni indotte su un provino da un carico noto, la rigidezza del campione stesso. Tale prova risulta essere poco invasiva ma elevate sollecitazioni possono anche alterare le caratteristiche del campione.
- La **perdita di particelle**: tale test, denominato Cantabro Loss Test viene invece effettuato mediante un macchinario denominato *Los Angeles*. Esso simula il passaggio ripetuto degli pneumatici sul conglomerato bituminoso. Lo studio della quantità degli aggregati che si staccano dal provino fornisce importanti informazioni sulla resistenza all'usura del campione stesso e quindi anche della durata della sua vita utile. Questo è il test più invasivo tra quelli condotti ed è utile effettuarlo per ultimo in quanto il provino, al termine di questo test, risulta essere inutilizzabile.



### 3.4.1 Prova ITSM

Le prove per la valutazione del modulo ITSM (Indirect Tension Stiffness Modulus), ossia del modulo dinamico di rigidezza valutato mediante trazione indiretta dinamica, sono state condotte con un'apparecchiatura di prova in conformità alle specifiche presenti nella normativa EN 12697-26, per le quali si rimanda al capitolo 2. La macchina utilizzata (Figura 3.25), è una pressa dinamica IPC MATTA (Material Testing Apparatus), dotata di attuatore di carico pneumatico. L'esecuzione dei test è avvenuta presso il laboratorio DICAM di Strade.



Figura 3.251: Apparecchiatura per la prova ITSM

I moduli di rigidezza sono stati valutati su provini cilindrici aventi diametro pari a 150 mm, ottenuti dalla compattazione avvenuta tramite l'utilizzo di pressa a taglio giratoria. In accordo con la normativa, ed in relazione al diametro dei provini, la macchina è stata equipaggiata con listelli di carico larghi 19,8 mm (entro i  $19 \pm 1$  mm imposti dalla normativa) e con raggio di curvatura della superficie concava di 50 mm. Al fine di valutare l'andamento del modulo dinamico in funzione della temperatura di esercizio, i test sono stati eseguiti alle temperature di:  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  e  $35^{\circ}\text{C}$ . Come descritto nel Capitolo 2, la prova di trazione indiretta avviene in controllo di forza, applicando una sollecitazione tale da indurre nel provino una deformazione orizzontale pari allo 0,0033 % del diametro ( $50 \mu\text{e}$ ), ossia, nella fattispecie,  $5 \mu\text{m}$ . Tuttavia, per

temperature molto basse, l'attuatore pneumatico non è in grado di imprimere una forza tale da portare ad una deformazione diametrale pari a  $5\ \mu\text{m}$ . Per questo alle temperature di  $5^\circ\text{C}$  e  $10^\circ\text{C}$ , è stata imposta una deformazione pari a  $3\ \mu\text{m}$  (deformazione rientrante nei limiti imposti da normativa). La ricerca del carico è eseguita, ad ogni prova, attraverso 5 colpi di calibrazione (conditioning pulses). Prima del test, i provini sono stati conservati in camera termostatica fino al completo raggiungimento di una temperatura costante, coincidente con quella di prova, e comunque per non meno di centoventi minuti. Anche la camera di prova è stata preventivamente portata alla medesima temperatura, in modo che durante il test tutte le componenti dell'apparecchiatura, in particolare listelli di carico ed LVDT, siano alla stessa temperatura del provino. Di seguito sono riassunte le condizioni di prova (Figura 3.26):

- temperatura di prova (test temperature):  $5^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  e  $35^\circ\text{C}$ ;
- n. di colpi di condizionamento (conditioning pulse count): 5;
- n. di colpi di prova (test pulse count): 5;
- periodo di ripetizione dei colpi di prova (test pulse period): 3000 ms;
- rise-time: 124 ms;
- deformazione imposta (target peak deformation):  $5\ \mu\text{m}$  o  $3\ \mu\text{m}$ ;
- coefficiente di Poisson stimato: 0,35.

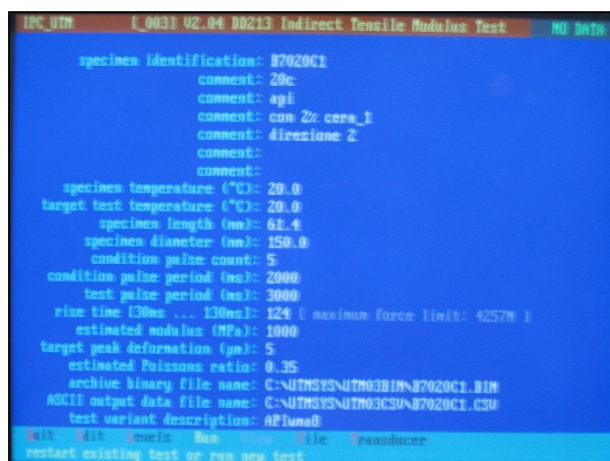


Figura 3.26: Schermata impostazione della prova

La prova ITSM è stata eseguita, per ognuna delle serie di campioni, sui tre provini aventi valore di modulo complesso più vicino al valor medio. L'individuazione di tali

provini è stata eseguita analizzando i risultati ottenuti dal test di riferimento condotto alla temperatura di 20°C (Tabelle 4.18, 4.19 e 4.20). Inoltre ogni provino deve essere sottoposto a diverse prove, almeno due, su giaciture ortogonali tra loro, fino all'ottenimento di valori rientranti nelle tolleranze prescritte in normativa.

### 3.4.2 Prova Cantabro

Le prove sulla perdita in peso del conglomerato bituminoso servono per analizzare il comportamento e la durabilità di una pavimentazione stradale soggetta all'azione continua e ripetuta del passaggio di veicoli. Difatti, l'azione del pneumatico sul conglomerato bituminoso, specialmente nei punti di massima accelerazione/decelerazione e in curva, porta a grandi stati di tensione tangenziali che tendono a separare gli aggregati lapidei dalla miscela bituminosa stessa e quindi ad usurare la pavimentazione.

La prova che meglio riassume questo fenomeno d'attrito viene denominata Cantabro Loss Test e vede impiegata la macchina Los Angeles (privata tuttavia delle 11 sfere di metallo).



Figura 3.27: Macchinario Los Angeles

Facendo ruotare il tamburo del macchinario ad una velocità prestabilita, il provino tenderà a sbattere ripetutamente contro la superficie interna del tamburo stesso,

simulando appunto un impatto nettamente accentuato di un pneumatico. Per ogni rivoluzione, e quindi per ogni urto, il provino perderà delle particelle (per lo più aggregati che si trovano in prossimità di vuoti superficiali o lungo gli spigoli).

I provini che, a parità di giri, tendono a perdere più particelle, avranno nettamente una vita utile minore in quanto significa che, a parità di sollecitazioni, avranno un altissimo distacco di aggregati.

Questa prova è fondamentale per studiare le caratteristiche prestazionali dei conglomerati bituminosi prevenienti da autodromi in quanto essi devono avere caratteristiche speciali che miscele bituminose tradizionali non devono avere. Bisogna comunque affermare che la prova da un risultato di massima da tenere in considerazione soprattutto dopo un'approfondita analisi del campione. Difatti il risultato è nettamente influenzato da 3 fattori:

1. Temperatura di prova
2. Metodo di compattazione
3. Dimensioni del provino

Paragonare risultati con provini aventi caratteristiche diverse darebbe quindi risultati errati.

Bisogna quindi adottare le stesse condizioni al contorno per tutti i provini e soprattutto compiere correttamente il test, seguendo alla lettera i seguenti punti:

1. *Lasciare il provino, completamente asciutto, per almeno 4 ore alla temperatura di 20°C*
2. *Pesare il provino ( $m_1$ )*
3. *Inserire il provino dentro alla Los Angeles accertandosi che siano state rimosse le sfere metalliche*
4. *Impostare la Los Angeles a 300 rivoluzioni, con velocità pari a 3,5 rad/s*
5. *Far partire il Test, verificando inizialmente che la temperatura del tamburo della Los Angeles sia la stessa di quella del provino*
6. *Al termine della prova, estrarre il provino, rimuovere con un panno le particelle sciolte attaccate al provino*
7. *Pesare il provino privo delle particelle sciolte ( $m_2$ )*

È importante sottolineare che la procedura non richiede l'utilizzo di 11 sfere di metallo impiegate nel test Los Angeles. Difatti il provino deve impattare solamente sulla superficie interna del tamburo per poter simulare l'impatto pneumatico-conglomerato bituminoso.

Al termine di questa procedura, la % in peso delle particelle staccatesi dal provino si può ottenere con la seguente formula:

$$PL = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad [3.12]$$

Come ogni prova, il risultato finale che caratterizza la perdita delle particelle di un determinato conglomerato bituminoso non sarà altro che la media dei risultati ottenuti da tutti i provini.

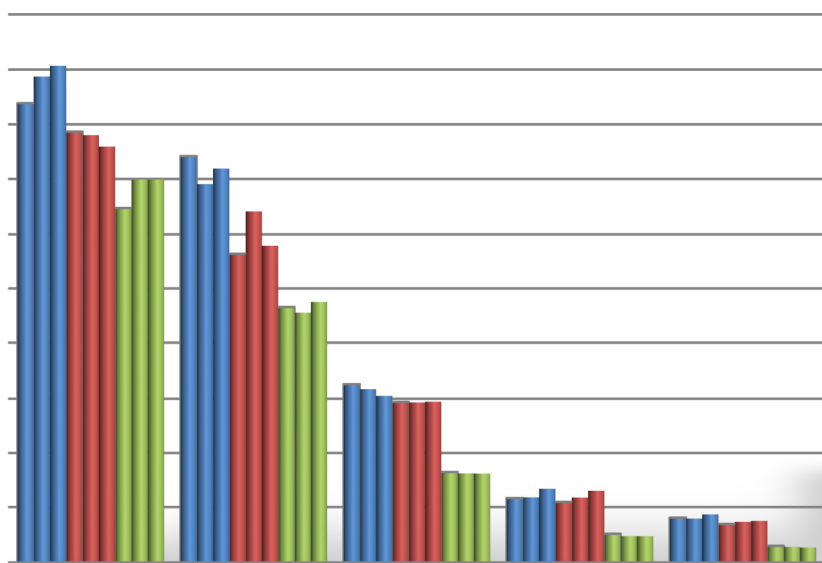


Figura 3.28: Procedura Cantabro Loss Test



# Capitolo 4

## *Analisi dei Risultati*







## ***Capitolo 4 - ANALISI DEI RISULTATI***

Dopo aver esaminato le tipologie di prova effettuate su campioni ottenuti mediante la compattazione di conglomerati bituminosi prelevati da circuiti automobilistici italiani differenti, si fornisce ora una dettagliata analisi dei risultati ottenuti, al fine di evidenziare le proprietà e le caratteristiche prestazionali delle miscele. Per ogni test, riportando in parallelo tutti i risultati ottenuti, si può così effettuare un confronto sulle diverse qualità che caratterizzano i conglomerati bituminosi analizzati e determinare quali siano gli aspetti che influenzino maggiormente la risposta delle miscele stesse.

Si procede ora ad esaminare prima i risultati ottenuti dai test volumetrici e poi quelli ottenuti da quelli meccanici, avvalendosi dell'utilizzo di tabelle ed immagini al fine di avere una chiara visione grafica delle caratteristiche dei campioni e quindi dei rispettivi conglomerati bituminosi.

### ***4.1 Test di Caratterizzazione Volumetrica***

I test volumetrici, come è stato ampiamente illustrato nel capitolo precedente, sono stati condotti per ottenere informazioni in merito alla massa volumica massima e a quella apparente dei provini. Tramite questi due risultati, si è così riuscito ad ottenere la percentuale dei vuoti, caratteristica intrinseca dei provini e quindi del rispettivo conglomerato bituminoso. Oltre alla percentuale dei vuoti, un altro aspetto di fondamentale importanza che verrà analizzato e che esprime le qualità di una miscela bituminosa è l'addensamento ottenuto mediante la procedura SGC menzionata nel paragrafo 3.2.3. Si procede ora ad analizzare i risultati così ottenuti.

#### 4.1.1 Massa volumica massima

La *densità massima* non dipende dal metodo di compattazione e/o dal provino, pertanto il valore ottenuto mediante la procedura spiegata nel paragrafo 3.3.1 è un valore unitario che vale per tutto il conglomerato bituminoso del determinato autodromo.

Nella tabella 4.1 si possono osservare i diversi indici di *massa volumica massima* ottenuti dall'analisi delle miscele esaminate.

<b>Massa Volumica Massima</b>	
Id.	Massa Volumica Massima [kg/m <sup>3</sup> ]
Miscela di Prova	2540
Imola	2405
Monza	2535
Mugello	2520

Tabella 4.1 – Massa volumica massima autodromi

Nella figura seguente verrà rappresentato un istogramma atto a dare una visione grafica dei risultati appena evidenziati.

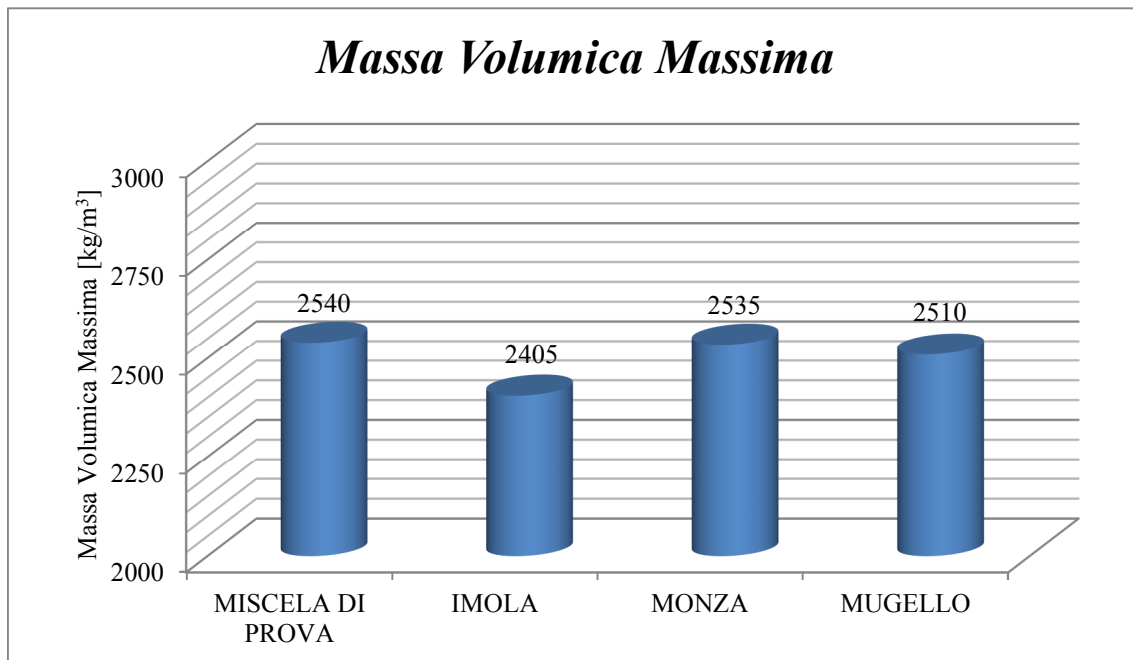


Figura 4.1: Massa volumica massima autodromi

Dai risultati, si può evincere come il conglomerato bituminoso più denso sia sicuramente quello della Miscela di Prova (con  $2540 \text{ kg/m}^3$ ), subito seguito da quello prelevato dal circuito di Monza (con  $2535 \text{ kg/m}^3$ ) e da quello del Mugello (con  $2520 \text{ kg/m}^3$ ). La miscela bituminosa dell'autodromo di Imola, invece, con i suoi  $2405 \text{ kg/m}^3$ , presenta una densità nettamente minore rispetto ai primi tre.

Il fattore che influisce maggiormente sul valore della densità massima è indubbiamente la percentuale di bitume scelto, la curva granulometrica scelta degli inerti e soprattutto la densità del legante e degli aggregati utilizzati: le miscele aventi aggregati basaltici (miscela di prova e Mugello) o calcarei (Monza), infatti, presentano, a parità di percentuale di bitume, una *massa volumica massima* maggiore rispetto ai conglomerati bituminosi aventi inerti di tipo porfirico (Imola).

#### **4.1.2 Massa volumica apparente**

La *massa volumica apparente* dipende, oltre che dal conglomerato bituminoso impiegato, anche dal metodo di compattazione, e non si può considerare costante per ogni provino. Difatti, i campioni provenienti dallo stesso conglomerato bituminoso e compattati con la stessa procedura avranno simili caratteristiche volumetriche, simili curve granulometriche e simili percentuali di bitume, ma non saranno mai uguali. Quindi, per avere un risultato il più possibile veritiero, bisogna munirsi di un numero elevato di provini in modo da poter fare una media attendibile tra i valori ottenuti. Si è perciò scelto di analizzare per ogni conglomerato bituminoso almeno venti provini, la metà dei quali compattati con il Roller Compactor e l'altra metà con la Marshall Compactor. Il risultato ottenuto sottolinea non solo la differenza di risultato tra miscele bituminose differenti, ma anche quella tra provini provenienti dallo stesso conglomerato bituminoso e compattati con procedure differenti.

Per calcolare la *massa volumica apparente* di ogni provino sono stati condotti tutti e quattro i procedimenti spiegati nel capitolo precedente, il più attendibile dei quali risulta essere la procedura B, ossia quello impiegato per provini con una superficie densa.

Di seguito, nelle tabelle 4. 2 ÷ 4.8, sono riportati i risultati ottenuti, suddivisi in base al metodo di compattazione.

**4.1.2.1 Miscela di Prova**

<b>Massa Volumica Apparente Miscela di Prova – compattazione Roller Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2474	2460	2393	2431
2	2468	2444	2352	2398
3	2463	2449	2356	2380
4	2477	2465	2391	2434
5	2472	2462	2399	2420
6	2466	2453	2385	2401
7	2469	2451	2354	2397
8	2480	2471	2394	2417
9	2459	2432	2356	2352
10	2471	2460	2381	2411
Media	2470	<b>2455</b>	2376	2404

Tabella 4.2 – Massa volumica apparente Miscela di Prova con compattazione mediante Roller Compactor

<b>Massa Volumica Apparente Miscela di Prova – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2493	2474	2393	1734
2	2472	2451	2374	1734
3	2489	2470	2376	1726
4	2515	2505	2407	1765
5	2519	2505	2405	1763
6	2506	2494	2384	1731
7	2501	2491	2389	1741
8	2501	2494	2398	1752
9	2499	2488	2384	1726
Media	2499	<b>2486</b>	2390	1741

Tabella 4.3 – Massa volumica apparente Miscela di Prova con compattazione mediante Marshall Compactor

## 4.1.2.2 Imola

<b>Massa Volumica Apparente Imola – compattazione Roller Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2360	2352	2298	2277
2	2376	2369	2313	2296
3	2380	2376	2321	2322
4	2378	2373	2319	2333
5	2382	2379	2315	2340
6	2381	2376	2322	2309
7	2381	2374	2321	2313
8	2380	2375	2317	2344
9	2380	2374	2316	2265
10	2372	2364	2313	2312
11	2382	2378	2319	2350
Media	2405	<b>2372</b>	2316	2315

Tabella 4.4 – Massa volumica apparente Imola con compattazione mediante Roller Compactor

<b>Massa Volumica Apparente Imola – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2360	2347	2278	2197
2	2371	2359	2292	2252
3	2361	2350	2279	2240
4	2373	2363	2299	2244
5	2368	2358	2285	2265
6	2341	2315	2216	2145
7	2368	2352	2285	2240
8	2372	2363	2299	2252
9	2372	2361	2298	2262
Media	2365	<b>2352</b>	2281	2233

Tabella 4.5 – Massa volumica apparente Imola con compattazione mediante Marshall Compactor

4.1.2.3 **Monza**

<b>Massa Volumica Apparente Monza – compattazione Roller Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2516	2512	2443	2494
2	2528	2522	2468	2423
3	2519	2514	2460	2468
4	2510	2504	2436	2460
5	2489	2484	2435	2409
6	2527	2519	2457	2457
7	2499	2492	2435	2437
8	2502	2493	2438	2421
9	2521	2514	2461	2424
Media	2512	<b>2506</b>	2448	2444

Tabella 4.6 – Massa volumica apparente Monza con compattazione mediante Roller Compactor

<b>Massa Volumica Apparente Monza – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2473	2454	2364	1690
2	2476	2463	2381	1696
3	2493	2480	2412	1735
4	2492	2480	2401	1734
5	2487	2477	2406	1719
6	2485	2476	2409	1720
7	2487	2475	2411	1724
8	2496	2486	2410	1729
9	2493	2484	2417	1735
Media	2487	<b>2475</b>	2401	1720

Tabella 4.7 – Massa volumica apparente Monza con compattazione mediante Marshall Compactor

4.1.2.4 *Mugello*

<b>Massa Volumica Apparente Mugello – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> $\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura B</i> $\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura C</i> $\rho_{bsea}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>Procedura D</i> $\rho_{bdim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	2468	2440	2378	2188
2	2460	2438	2371	2242
3	2463	2439	2393	2203
4	2455	2425	2371	2232
5	2451	2420	2372	2253
6	2459	2441	2370	2184
7	2459	2432	2379	2232
8	2471	2445	2376	2169
9	2466	2439	2376	2257
Media	2461	<b>2435</b>	2374	2218

Tabella 4.8 – Massa volumica apparente Mugello con compattazione mediante Marshall Compactor

4.1.2.5 *Analisi dei Risultati*

Con la figura seguente, si riassumono i risultati ottenuti nelle tabelle precedenti mediante un istogramma, al fine di dare una visione grafica dei valori ottenuti.

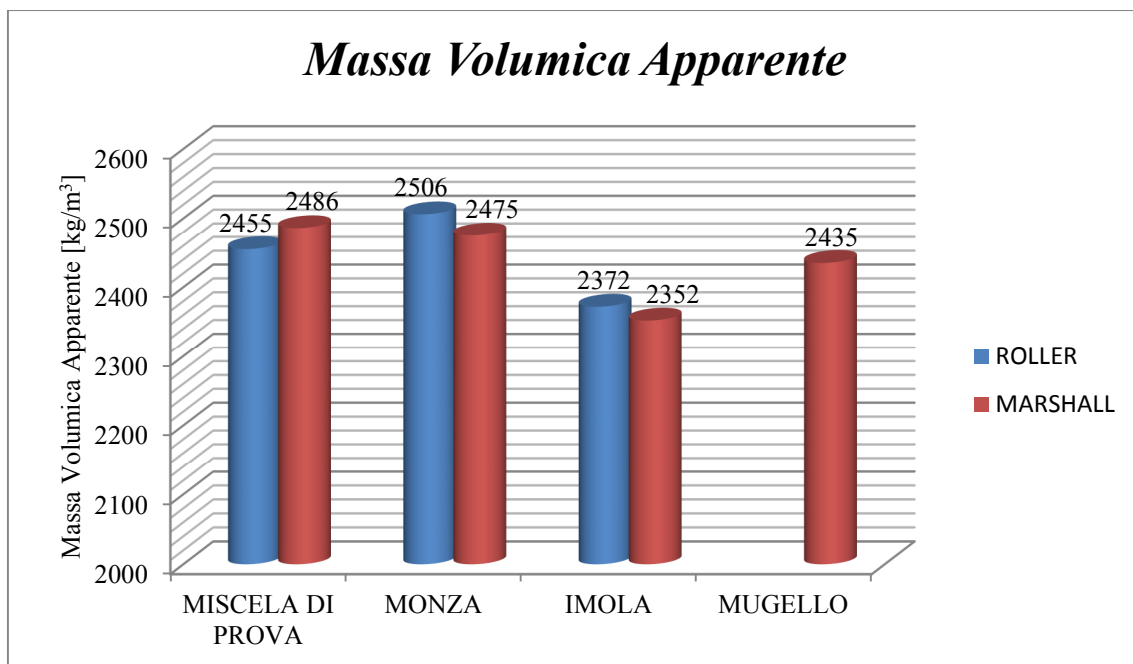


Figura 4.2: Massa volumica apparente autodromi

Da quanto si può vedere in figura 4.2, come nel calcolo della *massa volumica massima*, i conglomerati bituminosi aventi una maggiore densità sono nuovamente quelli di Monza, del Mugello e la Miscela di Prova. Questo sottolinea come la scelta dei materiali (di tipo basaltico e calcareo) porti a livelli di addensamento nettamente maggiori rispetto a quelli di tipo porfirico (caratteristici della miscela bituminosa del circuito automobilistico di Imola).

Oltre alla scelta dei materiali, si è potuto facilmente riscontrare che un altro aspetto che influisce decisamente sulla densità è il metodo di compattazione scelto. Difatti, sia per il conglomerato bituminoso proveniente da Monza sia per quello proveniente da Imola, una compattazione mediante Roller Compactor fornisce provini aventi una densità maggiore rispetto a quelli ottenuti mediante Marshall Compactor.

L'unica eccezione avviene per la Miscela di Prova dove la densità dei provini ottenuti mediante Marshall Compactor è lievemente superiore a quella dei provini carotati dalla Slab. Una spiegazione plausibile potrebbe risiedere nell'insufficiente mescolamento della miscela bituminosa. Difatti, una volta confezionato il conglomerato bituminoso in laboratorio, si è proceduto con il separare quello destinato alla compattazione Marshall da quello mediante Roller Compactor. A causa di un'amalgama non ottimale, il conglomerato bituminoso avente più aggregati fini è stato compattato con il metodo impulsivo, mentre quello con più aggregati grossi mediante il rullo. Poiché gli inerti quali sabbia e filler riescono a compattarsi meglio rispetto a ghiaia e pietrisco, la compattazione Marshall di questo tipo di miscela ha dato i risultati migliori in termini di addensamento.

Per quanto concerne la miscela bituminosa proveniente dall'autodromo del Mugello, si sono invece subito notate caratteristiche prestazionali nettamente inferiori rispetto a quelli degli altri circuiti. Il motivo deriva dal fatto che il prelievo di questo conglomerato bituminoso non è stato effettuato dalla coclea (come fatto per tutte le altre miscele bituminose) ma dalla tramoggia della vibrofinitrice, dove il materiale si raffredda facilmente e perde velocemente le sue caratteristiche prestazionali. È proprio per questo motivo che, dopo un primo riscontro con i provini compattati mediante prova



Marshall si è deciso di annullare i test con compattazione mediante rullo, per evitare di ottenere risultati poco veritieri se non fuorvianti.

#### 4.1.3 Percentuale dei vuoti

Calcolate le *masse volumiche massime ed apparenti*, si è quindi ottenuto, mediante la formula [3.11] la *percentuale dei vuoti* di ogni singolo provino.

Poiché la densità apparente di un campione dipende dal tipo di procedimento adottato, ne consegue che si otterranno quattro *percentuali dei vuoti* differenti, la più esatta delle quali risulta essere quella calcolata utilizzando la procedura B (per provini con superficie densa).

La percentuale totale dei vuoti di un conglomerato bituminoso compattato con un determinato metodo non è altro che la media dei valori ottenuti dai singoli provini e verrà rappresentata nelle tabelle seguenti.

##### 4.1.3.1 *Miscela di Prova*

<b>% Vuoti Miscela di Prova – compattazione Roller Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	2,582	3,132	5,786	4,287
2	2,846	3,778	7,388	5,610
3	3,023	3,573	7,247	6,311
4	2,464	2,949	5,848	4,182
5	2,694	3,059	5,563	4,737
6	2,894	3,414	6,099	5,462
7	2,812	3,505	7,316	5,632
8	2,362	2,698	5,740	4,842
9	3,204	4,236	7,263	7,408
10	2,721	3,162	6,241	5,062
Media	2,760	<b>3,351</b>	6,449	5,353

Tabella 4.9 – % Vuoti Miscela di Prova con compattazione mediante Roller Compactor

<b>% Vuoti Miscela di Prova – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	1,854	2,604	5,798	3,175
2	2,683	3,496	6,543	3,173
3	2,023	2,746	6,456	3,204
4	0,979	1,390	5,225	3,052
5	0,821	1,383	5,310	3,061
6	1,327	1,830	6,155	3,184
7	1,538	1,910	5,954	3,147
8	1,521	1,820	5,597	3,103
9	1,620	2,036	6,141	3,204
Media	1,596	<b>2,135</b>	5,909	3,145

Tabella 4.10 – % Vuoti Miscela di Prova con compattazione mediante Marshall Compactor

#### 4.1.3.2 Imola

<b>% Vuoti Imola – compattazione Roller Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	1,858	2,200	4,463	5,340
2	1,198	1,505	3,836	4,538
3	1,025	1,187	3,485	3,465
4	1,125	1,329	3,583	2,980
5	0,937	1,097	3,735	2,684
6	0,985	1,188	3,452	3,984
7	1,018	1,284	3,483	3,838
8	1,032	1,228	3,655	2,551
9	1,059	1,277	3,708	5,822
10	1,366	1,712	3,828	3,885
11	0,949	1,115	3,577	2,303
Media	1,141	<b>1,375</b>	3,709	3,763

Tabella 4.11 – % Vuoti Imola con compattazione mediante Roller Compactor

<b>% Vuoti Imola – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	1,874	2,405	5,293	8,662
2	1,415	1,906	4,293	6,367
3	1,823	2,268	4,681	6,850
4	1,335	1,751	5,226	6,697
5	1,558	1,960	4,425	5,807
6	2,645	3,735	5,004	10,832
7	1,554	2,196	7,873	6,864
8	1,363	1,753	5,003	6,382
9	1,369	1,811	4,392	5,939
Media	1,660	<b>2,198</b>	5,151	7,156

Tabella 4.12 – % Vuoti Imola con compattazione mediante Marshall Compactor

#### 4.1.3.3 Monza

<b>% Vuoti Monza – compattazione Roller Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	0,740	0,907	3,637	1,597
2	0,272	0,487	2,649	4,398
3	0,601	0,812	2,961	2,650
4	0,990	1,215	3,903	2,947
5	1,784	1,999	3,940	4,959
6	0,322	0,613	3,050	3,050
7	1,390	1,698	3,914	3,863
8	1,296	1,650	3,824	4,499
9	0,540	0,824	2,904	4,348
Media	0,882	<b>1,134</b>	3,420	3,590

Tabella 4.13 – % Vuoti Monza con compattazione mediante Roller Compactor

<b>% Vuoti Monza – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	2,429	3,196	6,717	3,331
2	2,321	2,844	6,060	3,310
3	1,629	2,162	4,825	3,153
4	1,680	2,151	5,263	3,161
5	1,881	2,276	5,062	3,218
6	1,965	2,306	4,946	3,313
7	1,877	2,358	4,872	3,200
8	1,529	1,916	4,933	3,177
9	1,629	2,015	4,629	3,153
Media	1,882	<b>2,358</b>	5,256	3,213

Tabella 4.14 – % Vuoti Monza con compattazione mediante Marshall Compactor

#### 4.1.3.4 Mugello

<b>% Vuoti Mugello – compattazione Marshall Compactor</b>				
<i>N° Provino</i>	<i>Procedura A</i> [%]	<i>Procedura B</i> [%]	<i>Procedura C</i> [%]	<i>Procedura D</i> [%]
1	2,080	3,162	5,650	9,697
2	2,367	3,270	5,918	8,154
3	2,259	3,213	5,823	9,809
4	2,566	3,757	5,921	8,554
5	2,723	3,958	5,874	7,708
6	2,421	3,150	5,971	9,144
7	2,424	3,479	5,593	8,535
8	1,940	2,968	5,714	9,785
9	2,160	3,224	5,729	7,541
Media	2,327	<b>3,353</b>	5,799	8,770

Tabella 4.15 – % Vuoti Mugello con compattazione mediante Marshall Compactor

#### 4.1.3.5 Analisi dei Risultati

Nella seguente figura ecco una visione grafica di quanto ottenuto.

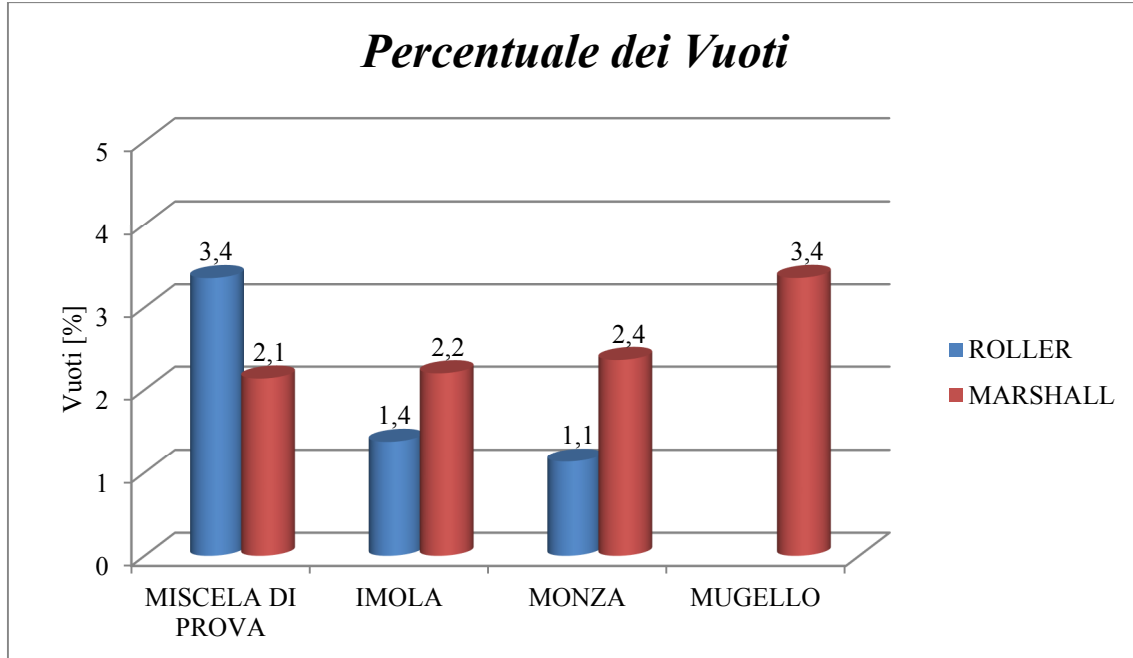


Figura 4.3: Percentuale dei vuoti autodromi

La *percentuale dei vuoti*, ottenuta dai valori delle densità massime ed apparenti, dipende anch'essa dagli aggregati, dalla percentuale di bitume e dalla metodologia di compattazione.

I conglomerati bituminosi aventi meno percentuali di vuoti sono sicuramente quelli di Imola e quello di Monza, con valori intorno all'1% con il metodo di compattazione mediante rulli e intorno al 2% con il metodo di compattazione mediante il macchinario Marshall.

Per quanto riguarda la Miscela di Prova, il motivo per cui si ha una percentuale di vuoti minore con il metodo impulsivo (2%) rispetto a quello con il Roller Compactor (3%) è dovuta all'errore di mescolamento spiegato in precedenza.

Confrontando i risultati ottenuti degli autodromi con quelli del conglomerato bituminoso confezionato in laboratorio, si può introdurre l'ipotesi che anche la scelta del legante possa influire sulla percentuale dei vuoti. Difatti, le miscele bituminose provenienti dagli autodromi di Monza e di Imola, confezionati con un bitume dalle

elevate caratteristiche prestazionali (LOWVAL HM40) presentano una percentuale dei vuoti minore rispetto a quello della Miscela di Prova, confezionato con un legante normale impiegato per strade urbane (bitume 70-100). Si può quindi osservare come tale differenza sia pari al punto percentuale.

Da sottolineare come nel grafico venga rappresentata anche la percentuale dei vuoti ottenuta dai provini compattati dal conglomerato bituminoso proveniente dal Mugello. Tale valore tuttavia viene considerato solo qualitativamente in quanto, come già spiegato, proviene dalla miscela bituminosa scartata durante la stesura. Naturalmente, come poi rilevato, date le basse caratteristiche volumetriche e meccaniche della miscela del Mugello, era da aspettarsi un valore della percentuale dei vuoti nettamente maggiore rispetto a quello proveniente dagli altri due autodromi.

#### 4.1.4 Addensamento

Per ogni campione è stata determinata la *densità volumica massima* e la *densità volumica apparente*, parametri necessari alla determinazione dell'*indice dei vuoti* (UNI EN 12697-8) in conformità alle normative vigenti, rispettivamente UNI EN 12697-5 e UNI EN 12697-6. I risultati sono riportati in tabella 4.16.

Campione	Id.	Densità Volumica Massima [kg/m <sup>3</sup> ]	Densità Volumica Apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Valor medio D.V.A. [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Miscela di Prova</b>	1	2540	2450	2448
	2	2540	2456	
	3	2540	2415	
	4	2540	2461	
	5	2540	2476	
	6	2540	2430	
<b>Imola</b>	1	2405	2358	2350
	2	2405	2345	
	3	2405	2358	
	4	2405	2353	
	5	2405	2347	
	6	2405	2340	
<b>Monza</b>	1	2535	2482	2481
	2	2535	2482	
	3	2535	2477	
	4	2535	2489	
	5	2535	2480	
	6	2535	2473	

Tabella 4.16 – Tavola riassuntiva densità

Durante i periodi di compattazione mediante Pressa Giratoria sono stati acquisiti, per ogni campione, i dati relativi all'altezza media del materiale sottoposto a compressione all'interno della fustella in funzione del numero di giri. L'opportuna rielaborazione dei dati ha consentito la costruzione delle curve di addensamento e controllo delle relative caratteristiche volumetriche, riportate in tabella 4.17.

Campione	Id.	Grado di addensamento raggiunto [%]	Indice dei vuoti [%]	Valor medio % V [%]	T mixing [°C]	Deviazione standard [%]
<b>Monza</b>	1	97,93	2,07	2,14	180	0,09
	2	97,92	2,08			
	3	97,73	2,27			
	4	98,21	1,79	2,12	150	0,26
	5	97,84	2,16			
	6	97,58	2,42			
<b>Imola</b>	1	98,04	1,96	2,14	180	0,26
	2	97,50	2,50			
	3	98,05	1,95			
	4	97,85	2,15	2,42	150	0,23
	5	97,61	2,39			
	6	97,28	2,72			
<b>Miscela di Prova</b>	1	96,46	3,54	3,92	180	0,72
	2	96,71	3,29			
	3	95,07	4,93			
	4	96,90	3,10	3,32	150	0,75
	5	97,47	2,53			
	6	95,67	4,33			

Tabella 4.17 – Tavola riassuntiva dei dati relativi alle curve di addensamento

Di seguito sono riportate le curve di addensamento ricavate dall'elaborazione dei dati riguardanti le tre serie di campioni, con successivo confronto (Figure 4.4 ÷ 4.7).



4.1.4.1 *Miscela di Prova*

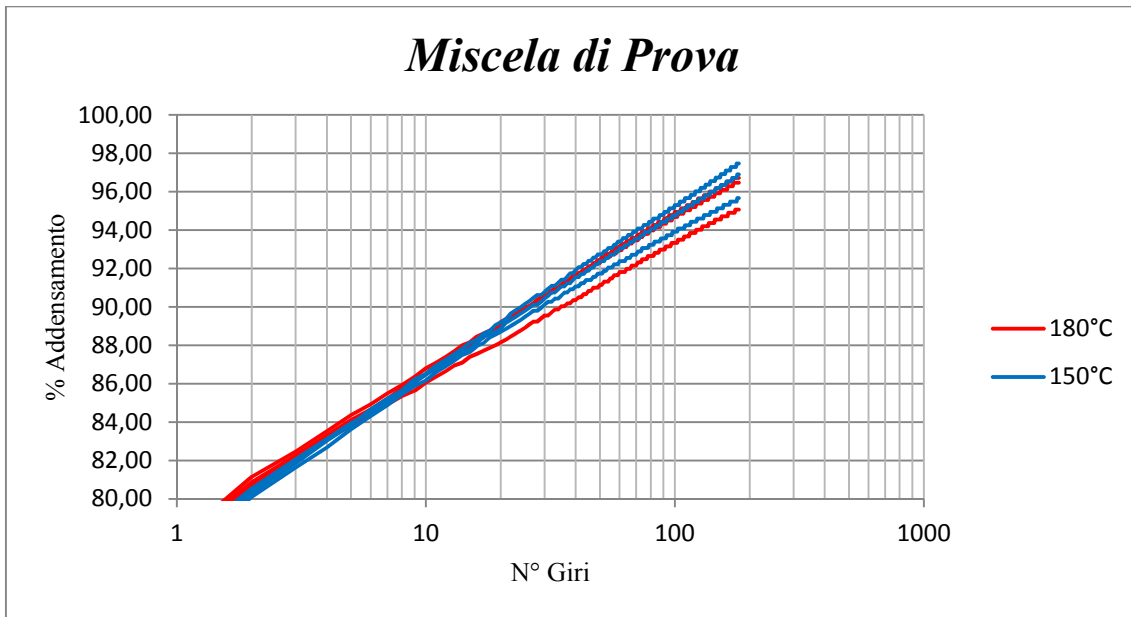


Figura 4.4: Grado di addensamento Miscela di Prova a 150°C e 180°C

4.1.4.2 *Imola*

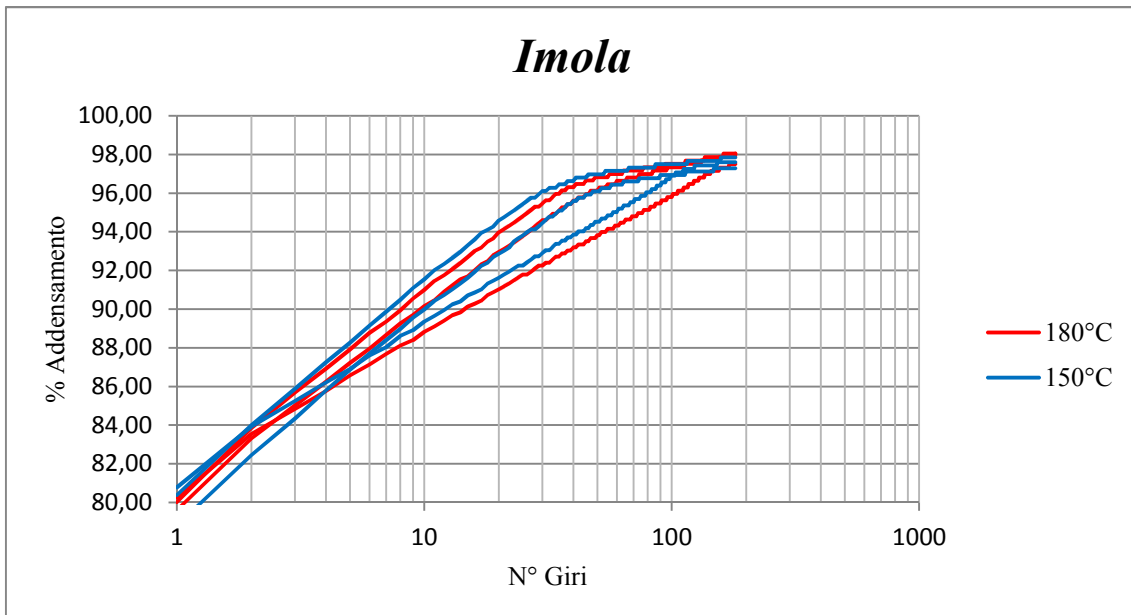


Figura 4.5: Grado di addensamento Imola a 150°C e 180°C

4.1.4.3 *Monza*



Figura 4.6: Grado di addensamento Monza a 150°C e 180°C

#### 4.1.4.4 *Analisi dei Risultati*

Nella figura successiva, verranno rappresentati in un solo grafico l'andamento dei gradi di addensamento dei diversi provini, per poter effettuare un confronto tra le diverse miscele bituminose.

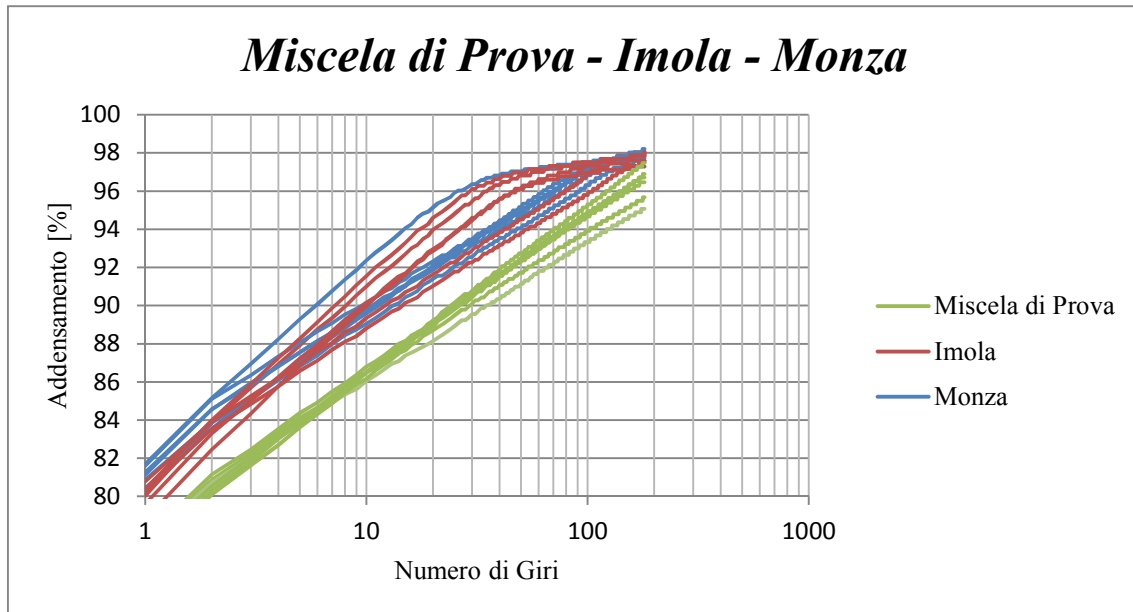


Figura 4.7: Confronto curve di addensamento dei tre conglomerati oggetto di studio

Analizzando i dati riportati in Tabella 4.17, rappresentati inoltre dall'andamento delle curve sopra illustrate, si nota che le proprietà volumetriche dei campioni non sono particolarmente influenzate dalla temperatura alla quale sono stati compattati (questo dimostra che già a 150°C si può ottenere un'ottima compattazione dei provini). Conclusioni interessanti, invece, possono essere tratte confrontando tra loro i diversi conglomerati bituminosi: si può osservare facilmente dal grafico in Figura 4.7 che i conglomerati bituminosi prelevati dai circuiti di Monza ed Imola presentano una percentuale d'addensamento maggiore, a parità dei numeri di giri, rispetto al conglomerato bituminoso ad uso stradale. Si può procedere con lo stesso ragionamento confrontando i valori di deviazione standard: i conglomerati bituminosi progettati per autodromi presentano un indice di dispersione pari ad un terzo rispetto a quello della Miscela di Prova. Il contributo positivo è certamente imputabile agli effetti del tipo di

bitume scelto (LOWVAL HM40), che non solo garantisce al conglomerato bituminoso livelli di qualità maggiori, ma assicura inoltre una compattazione più omogenea.

Da notare che per questo tipo di test, il conglomerato bituminoso proveniente dal Mugello è già stato accantonato per via delle sue proprietà poco attendibili.

## ***4.2 Test di Caratterizzazione Meccanica***

Tramite l'utilizzo dei test meccanici si sono invece ottenute informazioni in merito alla rigidità dinamica dei provini a determinate sollecitazioni e alla loro perdita di particelle. Tali risultati, come mostrato nel capitolo 3.4, sono stati conseguiti tramite lo svolgimento rispettivamente della prova ITSM, mediante il macchinario IPC MATTA, e della prova Cantabro, mediante il macchinario Los Angeles. I risultati delle prove verranno rappresentati mediante l'utilizzo di tabelle e appositi grafici in grado di dare una visione grafica precisa delle caratteristiche prestazionali dei provini così esaminati. Si procede ora con l'analisi dei risultati delle due prove meccaniche.

### ***4.2.1 Modulo di rigidità dinamico***

La prova ITSM è stata eseguita, per ognuna delle serie di campioni, sui tre provini aventi valore di modulo complesso più vicino al valor medio. L'individuazione di tali provini è stata eseguita analizzando i risultati ottenuti dal test di riferimento condotto alla temperatura di 20°C. Inoltre, ogni provino deve essere sottoposto a diverse prove, almeno due, su giaciture ortogonali tra loro, fino all'ottenimento di valori rientranti nelle tolleranze prescritte in normativa.

<b>Miscela di Prova a 20°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
1	20	74,5	BA2001a	Dir A	3511	3411	2,62
			BA2001b	Dir B	3310		
2	20	73,5	BA2002a	Dir A	3389	3461	4,02
			BA2002b	Dir B	3532		
3	20	73,5	BA2003a	Dir A	3197	3313	0,26
			BA2003b	Dir B	3428		
4	20	74,0	BA2004a	Dir A	3388	3189	4,15
			BA2004b	Dir B	2990		
5	20	75,0	BA2005a	Dir A	2914	3037	9,36
			BA2005b	Dir B	3160		
6	20	74,5	BA2006a	Dir A	3122	3235	2,68
			BA2006b	Dir B	3347		
7	20	74,5	BA2007a	Dir A	3648	3604	7,83
			BA2007b	Dir B	3559		
8	20	75,0	BA2008a	Dir A	3265	3264	1,77
			BA2008b	Dir B	3262		
9	20	74,0	BA2009a	Dir A	3547	3445	3,59
			BA2009b	Dir B	3343		
10	20	75,0	BA2010a	Dir A	3206	3257	1,99
			BA2010b	Dir B	3307		

Tabella 4.18 – Moduli dinamici Miscela di Prova a 20°C

<b>Imola a 20°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
1	20	73,5	IM2001a	Dir A	5407	5538	4,45
			IM2001b	Dir B	5668		
2	20	73,0	IM2002a	Dir A	5315	5419	6,73
			IM2002b	Dir B	5523		
3	20	73,5	IM2003a	Dir A	5695	5573	3,79
			IM2003b	Dir B	5450		
4	20	73,0	IM2004a	Dir A	5787	5901	1,98
			IM2004b	Dir B	6014		
5	20	73,5	IM2005a	Dir A	5790	5738	0,81
			IM2005b	Dir B	5685		
6	20	73,5	IM2006a	Dir A	5881	5889	1,78
			IM2006b	Dir B	5897		
7	20	73,5	IM2007a	Dir A	5937	5869	1,45
			IM2007b	Dir B	5801		
8	20	73,0	IM2008a	Dir A	5904	5924	2,36
			IM2008b	Dir B	5943		
9	20	73,0	IM2009a	Dir A	6140	6194	6,62
			IM2009b	Dir B	6248		
10	20	72,5	IM2010a	Dir A	6175	5896	1,89
			IM2010b	Dir B	5616		
11	20	73,5	IM2011a	Dir A	5320	6186	1,73
			IM2011b	Dir B	6051		

Tabella 4.19 – Moduli dinamici Imola a 20°C

<b>Monza a 20°C</b>							
<i>Ident.</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Altezza [mm]</i>	<i>Nome file</i>	<i>Direz.</i>	<i>Modulo Adj. [MPa]</i>	<i>Modulo Adj. Medio [MPa]</i>	<i>Scarto dal valor medio [%]</i>
<b>1</b>	20	68,5	MO2001a	Dir A	6696	<b>6520</b>	3,39
			MO2001b	Dir B	6344		
2	20	69,5	MO2002a	Dir A	6951	6725	6,33
			MO2002b	Dir B	6498		
3	20	69,0	MO2003a	Dir A	6560	6894	8,63
			MO2003b	Dir B	7228		
4	20	67,5	MO2004a	Dir A	7209	6940	9,23
			MO2004b	Dir B	6671		
<b>5</b>	20	68,0	MO2005a	Dir A	6097	<b>6343</b>	0,68
			MO2005b	Dir B	6588		
6	20	69,5	MO2006a	Dir A	5265	5391	16,86
			MO2006b	Dir B	5516		
7	20	68,5	MO2007a	Dir A	6149	5960	5,7
			MO2007b	Dir B	5770		
<b>8</b>	20	69,0	MO2008a	Dir A	6211	<b>6103</b>	3,22
			MO2008b	Dir B	5994		
9	20	69,5	MO2009a	Dir A	6304	5819	8,25
			MO2009b	Dir B	5334		

Tabella 4.20 – Moduli dinamici Monza a 20°C

I successivi test ITSM, svolti alle temperature di 5°C, 10°C, 30°C, 35°C, sono stati dunque eseguiti sui seguenti provini:

- per il conglomerato bituminoso della Miscela di Prova sono stati testati i provini *numero 3, 8 e 10*
- per il conglomerato bituminoso proveniente dall'autodromo di Imola sono stati testati i provini *numero 6, 7 e 10*
- per il conglomerato bituminoso proveniente dall'autodromo di Monza sono stati testati i provini *numero 1, 5 e 8*.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori di *modulo dinamico* ottenuti dai test eseguiti alle diverse temperature di prova (rispettivamente Tabelle 4.21 ÷ 4.35)

## 4.2.1.1 Miscela di Prova

<b>Miscela di Prova a 5°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
3	5	73,5	BA0503a	Dir A	12862	12951	5,27
			BA0503b	Dir B	13039		
8	5	75,0	BA0508a	Dir A	13432	13975	2,44
			BA0508b	Dir B	14517		
10	5	75,0	BA0510a	Dir A	13566	13975	2,44
			BA0510b	Dir B	14383		

Tabella 4.21 – Moduli dinamici Miscela di Prova a 5°C

<b>Miscela di Prova a 10°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
3	10	73,5	BA1003a	Dir A	8770	9331	0,08
			BA1003b	Dir B	9891		
8	10	75,0	BA1008a	Dir A	9348	9127	2,15
			BA1008b	Dir B	8905		
10	10	75,0	BA1010a	Dir A	9344	9512	1,98
			BA1010b	Dir B	9680		

Tabella 4.22 – Moduli dinamici Miscela di Prova a 10°C

<b>Miscela di Prova a 20°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
3	20	73,5	BA2003a	Dir A	3197	3313	0,26
			BA2003b	Dir B	3428		
8	20	75,0	BA2008a	Dir A	3265	3264	1,77
			BA2008b	Dir B	3262		
10	20	75,0	BA2010a	Dir A	3206	3257	1,99
			BA2010b	Dir B	3307		

Tabella 4.23 – Moduli dinamici Miscela di Prova a 20°C



<b>Miscela di Prova a 30°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
3	30	73,5	BA3003a	Dir A	1066	1038	5,72
			BA3003b	Dir B	1009		
8	30	75,0	BA3008a	Dir A	1004	951	2,91
			BA3008b	Dir B	898,6		
10	30	75,0	BA3010a	Dir A	985,1	947	3,34
			BA3010b	Dir B	908,9		

Tabella 4.24 – Moduli dinamici Miscela di Prova a 30°C

<b>Miscela di Prova a 35°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
3	35	73,5	BA3503a	Dir A	634,3	601	5,71
			BA3503b	Dir B	568,5		
8	35	75,0	BA3508a	Dir A	589,6	561	1,01
			BA3508b	Dir B	532,1		
10	35	75,0	BA3510a	Dir A	511,7	538	5,33
			BA3510b	Dir B	564,4		

Tabella 4.25 – Moduli dinamici Miscela di Prova a 35°C

#### 4.2.1.2 Imola

<b>Imola a 5°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
6	5	73,5	IM0506a	Dir A	16542	15742	1,40
			IM0506b	Dir B	14941		
7	5	73,5	IM0507a	Dir A	15338	15616	0,61
			IM0507b	Dir B	15893		
10	5	72,5	IM0510a	Dir A	15856	15205	2,08
			IM0510b	Dir B	14554		

Tabella 4.26 – Moduli dinamici Imola a 5°C

<b>Imola a 10°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
6	10	73,5	IM1006a	Dir A	11090	11252	5,67
			IM1006b	Dir B	11413		
7	10	73,5	IM1007a	Dir A	13681	12830	7,32
			IM1007b	Dir B	11978		
10	10	72,5	IM1010a	Dir A	11482	11589	2,60
			IM1010b	Dir B	11695		

Tabella 4.27 – Moduli dinamici Imola a 10°C

<b>Imola a 20°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
6	20	73,5	IM2006a	Dir A	5881	5889	1,78
			IM2006b	Dir B	5897		
7	20	73,5	IM2007a	Dir A	5937	5869	1,45
			IM2007b	Dir B	5801		
10	20	72,5	IM2010a	Dir A	6175	5896	1,89
			IM2010b	Dir B	5616		

Tabella 4.28 – Moduli dinamici Imola a 20°C

<b>Imola a 30°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
6	30	73,5	IM3006a	Dir A	2182	2187	8,50
			IM3006b	Dir B	2192		
7	30	73,5	IM3007a	Dir A	2250	2344	1,24
			IM3007b	Dir B	2437		
10	30	72,5	IM3010a	Dir A	2604	2588	8,31
			IM3010b	Dir B	2572		

Tabella 4.29 – Moduli dinamici Imola a 30°C

<b>Imola a 35°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
6	35	73,5	IM3506a	Dir A	1428	1390	4,44
			IM3506b	Dir B	1352		
7	35	73,5	IM3507a	Dir A	1402	1465	0,91
			IM3507b	Dir B	1527		
10	35	72,5	IM3510a	Dir A	1499	1500	3,22
			IM3510b	Dir B	1501		

Tabella 4.30 – Moduli dinamici Imola a 35°C

## 4.2.1.3 Monza

<b>Monza a 5°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
1	5	68,5	MO0501a	Dir A	17680	16756	4,71
			MO0501b	Dir B	15831		
6	5	68,0	MO0506a	Dir A	19129	17746	1,13
			MO0506b	Dir B	16363		
8	5	69,0	MO0508a	Dir A	18548	18135	3,25
			MO0508b	Dir B	17721		

Tabella 4.31 – Moduli dinamici Monza a 5°C

<b>Monza a 10°C</b>							
<b>Ident.</b>	<b>Temp. [°C]</b>	<b>Altezza [mm]</b>	<b>Nome file</b>	<b>Direz.</b>	<b>Modulo Adj. [MPa]</b>	<b>Modulo Adj. Medio [MPa]</b>	<b>Scarto dal valor medio [%]</b>
1	10	68,5	MO1001a	Dir A	15547	14866	3,46
			MO1001b	Dir B	14184		
6	10	68,0	MO1006a	Dir A	14380	13814	3,89
			MO1006b	Dir B	13248		
8	10	69,0	MO1008a	Dir A	14537	14375	0,16
			MO1008b	Dir B	14213		

Tabella 4.32 – Moduli dinamici Monza a 10°C

<b>Monza a 20°C</b>							
<i>Ident.</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Altezza [mm]</i>	<i>Nome file</i>	<i>Direz.</i>	<i>Modulo Adj. [MPa]</i>	<i>Modulo Adj. Medio [MPa]</i>	<i>Scarto dal valor medio [%]</i>
1	20	68,5	MO2001a	Dir A	6696	6520	3,39
			MO2001b	Dir B	6344		
5	20	68,0	MO2005a	Dir A	6097	6343	0,68
			MO2005b	Dir B	6588		
8	20	69,0	MO2008a	Dir A	6211	6103	3,22
			MO2008b	Dir B	5994		

Tabella 4.33 – Moduli dinamici Monza a 20°C

<b>Monza a 30°C</b>							
<i>Ident.</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Altezza [mm]</i>	<i>Nome file</i>	<i>Direz.</i>	<i>Modulo Adj. [MPa]</i>	<i>Modulo Adj. Medio [MPa]</i>	<i>Scarto dal valor medio [%]</i>
1	30	68,5	MO3001a	Dir A	2449	2325	5,86
			MO3001b	Dir B	2201		
6	30	68,0	MO3006a	Dir A	2179	2351	4,69
			MO3006b	Dir B	2523		
8	30	69,0	MO3008a	Dir A	2689	2708	9,11
			MO3008b	Dir B	2727		

Tabella 4.34 – Moduli dinamici Monza a 30°C

<b>Monza a 35°C</b>							
<i>Ident.</i>	<i>Temp. [°C]</i>	<i>Altezza [mm]</i>	<i>Nome file</i>	<i>Direz.</i>	<i>Modulo Adj. [MPa]</i>	<i>Modulo Adj. Medio [MPa]</i>	<i>Scarto dal valor medio [%]</i>
1	35	68,5	MO3501a	Dir A	1659	1621	1,56
			MO3501b	Dir B	1582		
6	35	68,0	MO3506a	Dir A	1556	1585	3,87
			MO3506b	Dir B	1614		
8	35	69,0	MO3508a	Dir A	1746	1733	5,00
			MO3508b	Dir B	1720		

Tabella 4.35 – Moduli dinamici Monza a 35°C

#### 4.2.1.4 Analisi dei Risultati

In Figura 4.8 è riportata una rappresentazione grafica dell'andamento dei moduli dinamici. In essa sono riportate le singole misure per ogni provino. Nella figura 4.9, invece, è riportato l'andamento del valor medio dei moduli per ogni serie in funzione delle diverse temperature di prova.

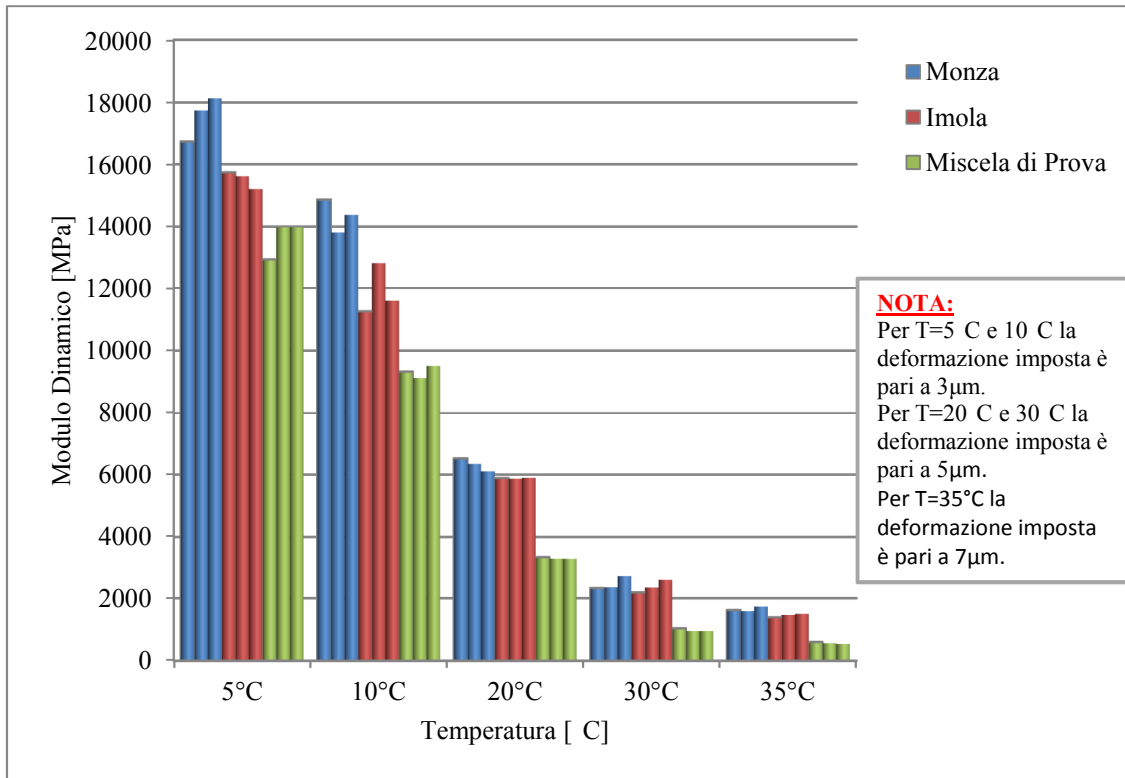


Figura 4.8: Andamento del modulo dinamico alle diverse temperature

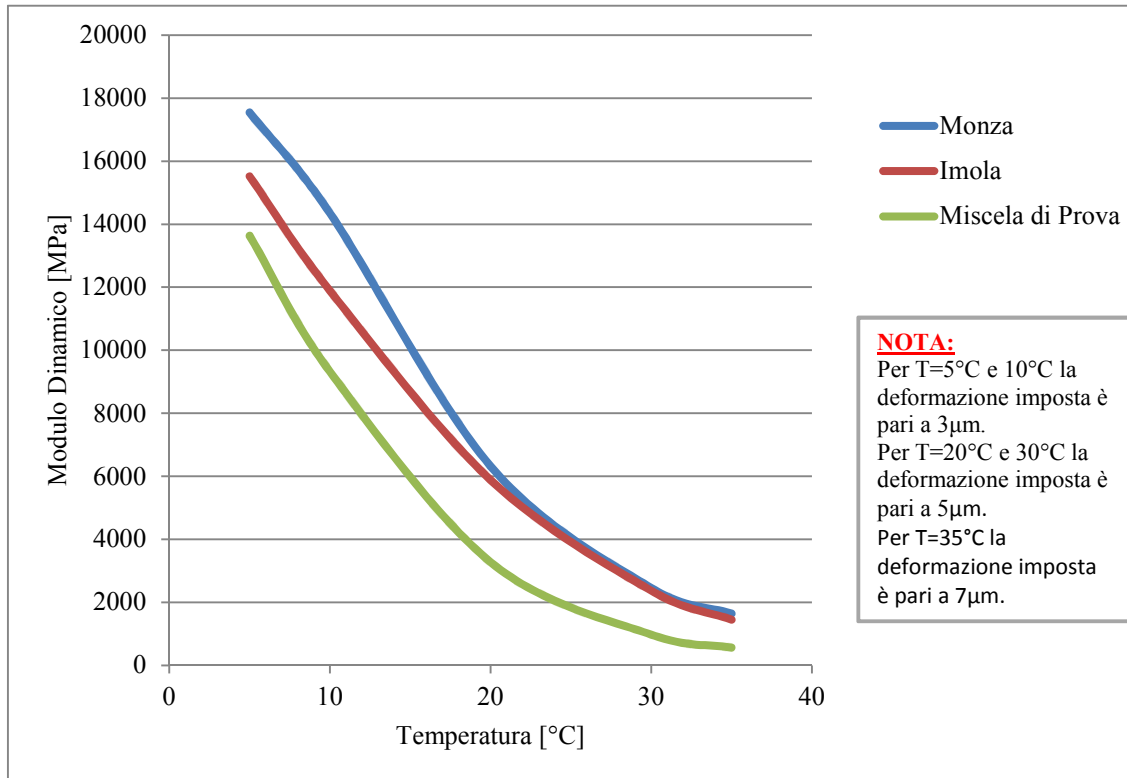


Figura 4.9: Andamento del valor medio del modulo dinamico alle diverse temperature

<b>Variation Standard "s" rispetto al valor medio</b>			
<b>Serie</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Valore Medio del Modulo Adj [MPa]</b>	<b>Deviazione Standard rispetto alla media</b>
Conglomerato Bituminoso di Monza	5	17545,3	3,3%
	10	14351,5	3,0%
	20	6321,7	2,7%
	30	2461,3	7,1%
	35	1646,2	3,8%
Conglomerato Bituminoso di Imola	5	15520,7	1,5%
	10	11889,8	5,7%
	20	5884,5	0,2%
	30	2372,8	7,0%
	35	1451,5	3,2%
Conglomerato confezionato con legante B 70-100 e aggregati basaltici	5	13633,2	3,5%
	10	9323,0	1,7%
	20	3277,5	0,8%
	30	978,6	4,3%
	35	566,8	4,6%

Tabella 4.36 – Valutazione della deviazione standard rispetto al valor medio di Modulo Dinamico

Dalla Figura 4.8 si osserva che le misure presentano una dispersione attorno al valor medio, con una variazione piuttosto importante della deviazione standard rispetto al modulo medio del materiale (Tabella 4.36). È tuttavia opinione condivisa che questa sia una caratteristica intrinseca del metodo di prova utilizzato. Il modulo a trazione indiretta dinamica, infatti, è molto sensibile alle modalità di esecuzione e alle caratteristiche del provino testato: piccole oscillazioni di temperatura portano a variazioni significativamente sul modulo di rigidità, così come la casuale disposizione degli aggregati sulla particolare giacitura indagata. La dispersione dei dati, essendo imputabile alla combinazione dei suddetti effetti, è da ritenersi accettabile. Nonostante la dispersione, è comunque possibile individuare un andamento pressoché identico per le tre serie di materiali testati; come atteso, si osserva una diminuzione del valore di modulo dinamico con l'aumentare della temperatura. Si può comunque notare come il tipo di legante utilizzato per confezionare il conglomerato influisca molto sul risultato: il conglomerato confezionato con il bitume più prestazionale (quindi quello di Monza e di Imola) presenta valori di *Modulo Dinamico* maggiori a tutte le temperature di prova, risultando quindi più rigido della Miscela di Prova. Questa differenza si nota soprattutto a basse temperature, dove un conglomerato bituminoso destinato ad un circuito di Formula 1 risulta essere più rigido fino al 30% rispetto ad un conglomerato bituminoso ad uso stradale.

#### **4.2.2 Perdita in peso**

La prova Cantabro Loss Test è stata eseguita su tutti i provini provenienti dagli autodromi e dalla Miscela di Prova e compattati con le due prove Marshall e Roller Compactor.

Il valore finale che rappresenta la *perdita in peso* del determinato conglomerato bituminoso è stata ottenuta facendo la media dei risultati, verificando che la loro deviazione standard rispetto alla media non sia superiore a quella indicata dalla normativa *UNI EN 12697-26*.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori di *perdita in peso* ottenuti dai test (Tabelle 4.37 ÷ 4.43).

## 4.2.2.1 Miscela di Prova

<b>% Perdita in Peso Miscela di Prova – compattazione Roller Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1394,19	1360,80	33,39	2,39
2	1356,46	1305,93	50,53	3,73
3	1346,38	1317,63	28,75	2,14
4	1386,35	1359,56	26,79	1,93
5	1396,95	1352,15	44,80	3,21
6	1377,07	1330,83	46,24	3,36
7	1374,60	1317,71	56,89	4,14
8	1395,41	1362,39	33,02	2,37
9	1339,68	1288,74	50,94	3,80
10	1392,18	1371,78	20,40	1,47
Media			39,18	2,85

Tabella 4.37 – Perdita in peso Miscela di Prova – compattazione Roller Compactor

<b>% Perdita in Peso Miscela di Prova – compattazione Marshall Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1186,14	1161,20	24,94	2,10
2	1196,29	1149,26	47,03	3,93
3	1132,39	1084,28	48,11	4,25
4	1167,57	1141,02	26,55	2,27
5	1235,93	1205,44	30,49	2,47
6	1155,32	1125,02	30,30	2,62
7	1240,20	1211,19	29,01	2,34
8	1228,41	1193,88	34,53	2,81
9	1190,92	1156,33	34,59	2,90
Media			33,95	2,86

Tabella 4.38 – Perdita in peso Miscela di Prova – compattazione Marshall Compactor



4.2.2.2 *Imola*

<b>% Perdita in Peso Imola – compattazione Roller Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1327,36	1264,49	62,87	4,74
2	1329,51	1282,61	46,90	3,53
3	1353,66	1310,04	43,62	3,22
4	1351,21	1302,02	49,19	3,64
5	1351,07	1301,86	39,61	3,64
6	1346,38	1311,46	35,65	2,559
7	1348,43	1310,73	35,27	2,80
8	1357,18	1313,16	74,78	3,24
9	1324,71	1282,40	40,07	3,19
10	1329,43	1284,64	44,79	3,37
11	1356,36	1312,80	43,56	3,21
Media			46,94	3,38

Tabella 4.39 – Perdita in peso Imola – compattazione Roller Compactor

<b>% Perdita in Peso Imola – compattazione Marshall Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1178,19	1136,44	41,75	3,54
2	1177,64	1137,59	40,05	3,40
3	1189,87	1150,74	39,13	3,29
4	1173,49	1128,93	44,56	3,80
5	1175,43	1133,10	42,33	3,60
6	1150,21	1084,57	65,64	5,71
7	1173,66	1125,58	48,08	4,10
8	1216,89	1177,25	39,64	3,26
9	1173,79	1116,12	57,67	4,91
Media			46,54	3,96

Tabella 4.40 – Perdita in peso Imola – compattazione Marshall Compactor

4.2.2.3 *Monza*

<b>% Perdita in Peso Monza – compattazione Roller Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1328,50	1253,29	75,21	5,66
2	1335,98	1255,34	80,64	6,04
3	1337,21	1261,39	75,82	5,67
4	1304,16	1237,60	66,56	5,10
5	1299,47	1217,03	82,44	6,34
6	1341,37	1280,28	61,09	4,55
7	1310,98	1246,27	64,71	4,94
8	1311,82	1239,07	72,75	5,55
9	1336,68	1276,45	60,23	4,51
Media			71,05	5,37

Tabella 4.41 – Perdita in peso Monza – compattazione Roller Compactor

<b>% Perdita in Peso Monza – compattazione Marshall Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1175,74	1083,75	91,99	7,82
2	1169,83	1082,22	87,61	7,49
3	1177,64	1081,25	96,39	8,19
4	1176,38	1104,38	72,00	6,12
5	1176,32	1088,49	87,83	7,47
6	1177,00	1102,21	74,79	6,35
7	1169,61	1091,69	77,92	6,66
8	1173,51	1110,43	63,08	5,38
9	1177,64	1101,17	76,47	6,49
Media			80,90	6,89

Tabella 4.42 – Perdita in peso Monza – compattazione Marshall Compactor

4.2.2.4 *Mugello*

<b>% Perdita in Peso Mugello – compattazione Marshall Compactor</b>				
Id.	m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	Perdita in peso [g]	Perdita in peso [%]
1	1173,60	1076,42	97,18	8,28
2	1172,58	1074,37	98,21	8,38
3	1170,02	1081,67	88,35	7,55
4	1167,48	1075,38	92,10	7,89
5	1168,77	1070,05	98,72	8,45
6	1171,34	1069,43	101,91	8,70
7	1169,68	1069,43	98,63	8,43
8	1172,46	1071,05	99,17	8,46
9	1170,89	1073,29	100,78	8,61
Media			97,23	8,30

Tabella 4.43 – Perdita in peso Mugello – compattazione Marshall Compactor

4.2.2.5 *Analisi dei Risultati*

In figura 4.10, la visione grafica delle diverse perdite in peso delle varie miscele esaminate.

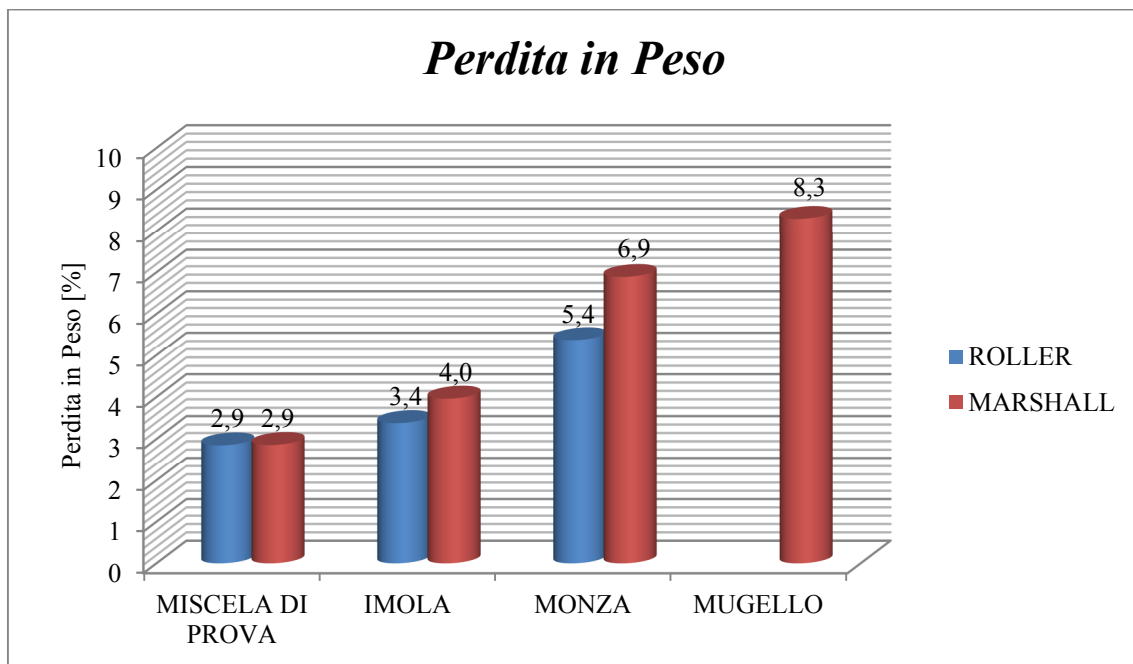


Figura 4.10: Perdita in Peso provini autodromi

Si può notare come la perdita in peso, in media, dipenda dal metodo di compattazione: la compattazione mediante Roller Compactor, nel caso di Imola e Monza, comporta un distaccamento di particelle minore rispetto a quella Marshall. La Miscela di Prova, invece, presenta valori di perdita in peso simili sia con la Compattazione mediante rullo sia mediante quella Marshall, ma il motivo è sempre da imputare alla errata miscelazione.

I provini con minor perdita di peso sono quelli della Miscela di Prova con valori medi attorno al 3%, a seguire troviamo quelli di Imola con valori attorno al 4%, e infine quelli di Monza con perdite in peso tra il 6 e il 7%.

Discorso a parte va fatto per i provini confezionati con la miscela bituminosa proveniente dal Mugello. I risultati, difatti, dimostrano come la qualità di questo conglomerato bituminoso sia nettamente minore rispetto agli altri, prova di un cattivo prelievo.

# **Capitolo 5**

## ***Conclusioni***



## **Capitolo 5 - CONCLUSIONI**

In questo elaborato si è cercato di determinare quali fossero le caratteristiche che influenzano maggiormente il comportamento delle miscele bituminose sotto elevate sollecitazioni. Dopo aver esaminato attentamente, in un primo momento, le proprietà dei conglomerati bituminosi prelevati, si è quindi deciso di compattarli, per poi testare i campioni così ottenuti.

L'alto numero di provini esaminati ha comportato l'impiego di un'elevata quantità di tempo e di materie prime, ma alla fine si è riusciti a ottenere risultati molto attendibili, indispensabili nel poter esaminare correttamente l'argomento trattato.

Si è notato che un fattore essenziale per poter studiare la resistenza dei conglomerati bituminosi alle sollecitazioni è la perdita in peso, valore ottenibile attraverso il Cantabro Loss Test che, come illustrato dalla normativa *UNI EN 12697-17*, comporta l'impiego del macchinario Los Angeles. Le miscele bituminose aventi una perdita di particelle maggiore sono quelle meno adatte ad essere impiegate in circuiti automobilistici, dove il problema del distacco degli inerti, specialmente nei punti critici, comporta la perdita di aderenza, con conseguenti problemi di sicurezza.

Una volta ottenuti i valori della perdita in peso dei conglomerati bituminosi, si è cercato di capire da cosa essi dipendessero. Sono stati quindi analizzati i risultati dei test volumetrici e meccanici per trovare eventuali relazioni tra le caratteristiche del provino e la perdita di inerti.

Con i test volumetrici, si sono calcolate le percentuali dei vuoti dei campioni tramite la determinazione delle loro masse volumiche massime ed apparenti. I risultati così ottenuti hanno permesso di stabilire una prima connessione tra la perdita in peso di un campione e la sua rispettiva percentuale di vuoti. Questo aspetto è facilmente intuibile nella tabella 5.1 e nella figura 5.1, dove si possono confrontare rispettivamente le medie e i singoli valori dei vuoti e delle perdite in peso dei provini ottenuti dalle miscele bituminose prese in esame durante l'elaborato.

	Compattazione Roller	
	Vuoti [%]	Perdita in Peso [%]
Miscela di Prova	3,4	2,9
Imola	1,4	3,4
Monza	1,1	5,4

Tabella 5.1: % Vuoti - % Perdita in Peso

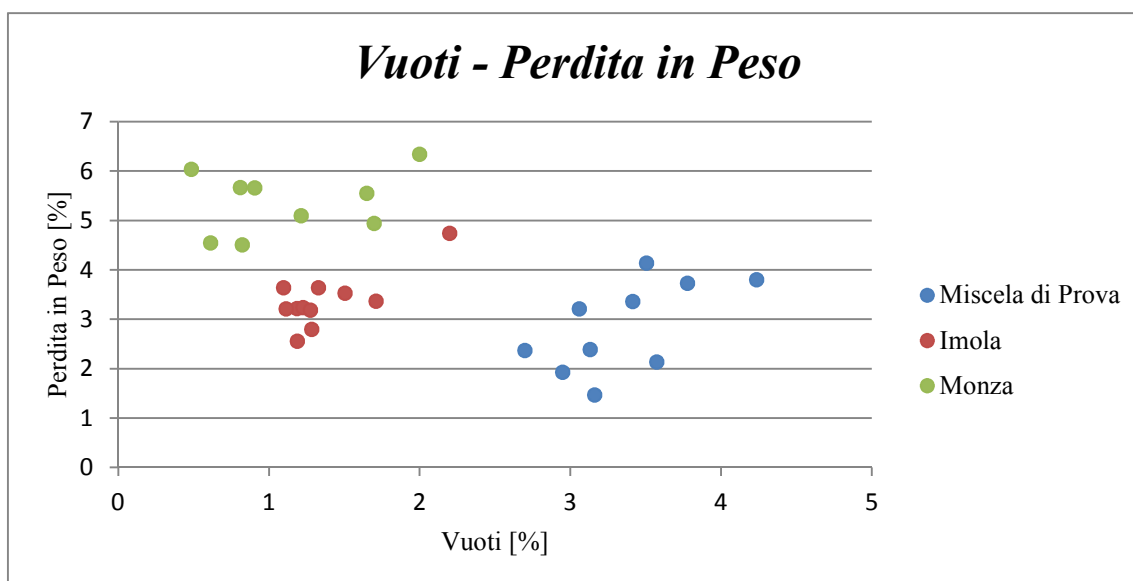


Figura 5.1: % Vuoti - % Perdita in Peso

Si può facilmente evincere come la miscela bituminosa avente una maggiore percentuale di vuoti sia quella di Prova, con una media del 3,4% e una varianza notevole. D'altra parte, i provini compattati dalle miscele bituminose provenienti dagli autodromi di Imola e di Monza presentano una percentuale di vuoti che si attesta attorno al punto percentuale e una varianza della popolazione nettamente più ristretta, in particolare per i campioni provenienti dalla miscela bituminosa dell'autodromo di Imola.

Per quanto concerne la perdita in peso, invece, i provini aventi una maggiore percentuale sono quelli provenienti dall'autodromo di Monza, con una media del 5,4%, mentre i campioni ottenuti dalla Miscela di Prova e dal conglomerato bituminoso del circuito di Imola presentano una perdita in peso che si aggira attorno al 3%. Come nel



caso della percentuale dei vuoti, anche nella perdita in peso i risultati aventi una varianza più ristretta sono quelli ottenuti dai provini provenienti dagli autodromi.

Evidenziata una prima corrispondenza tra perdita in peso e percentuale dei vuoti, si sono quindi esaminati e confrontati i risultati ottenuti dai due test meccanici, ovvero perdita in peso e modulo di rigidezza dinamico, quest'ultimo ottenuto con la prova *ITSM* mediante il macchinario *IPC MATTA*.

	Compattazione Roller	
	Rigidezza [MPa]	Perdita in Peso [%]
Miscela di Prova	3277,50	2,9
Imola	5884,50	3,4
Monza	6321,67	5,4

Tabella 5.2: Rigidezza a 20°C - % Perdita in Peso

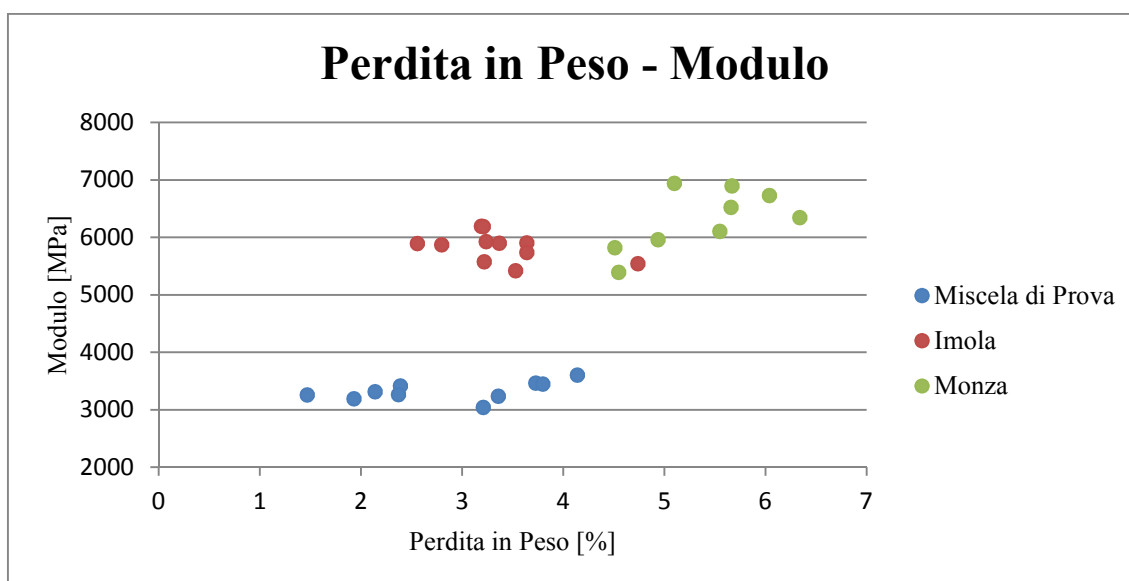


Immagine 5.2: Rigidezza a 20°C - % Perdita in Peso

Tramite la tabella 5.2 e la figura 5.2 si possono quindi confrontare i risultati ottenuti dai test meccanici. Avendo già esaminato i valori percentuali delle perdite in peso delle miscele, ci si limita ora ad analizzare i valori dei moduli dinamici dei provini studiati. I campioni ottenuti dalla Miscela di Prova sono caratterizzati da un basso modulo dinamico che si attesta sui 3277 MPa e con un indice di dispersione ristretto. I provini ottenuti invece dalle miscele bituminose provenienti dagli autodromi presentano invece

una rigidezza maggiore (5884 MPa per i provini ottenuti dalla miscela di Imola e 6321 MPa per i provini ottenuti da quella di Monza) e una media dello scarto quadratico medio ridotta, in particolare per i provini di Imola.

Studiate le connessioni tra percentuali di Vuoti-Perdita in Peso e Rigidezza-Perdita in Peso, si può eseguire un ultimo raffronto tra la percentuale dei vuoti e la rigidezza dei provini esaminati al fine di ricercare qualche possibile legame tra i due risultati.

Tramite la tabella 5.3 e la figura 5.3 si può notare un riscontro grafico della relazione tra le due grandezze.

	Compattazione Roller	
	Vuoti [%]	Rigidezza [MPa]
Miscela di Prova	3,4	3277,50
Imola	1,4	5884,50
Monza	1,1	6321,67

Tabella 5.3: % Vuoti - Rigidezza a 20°C

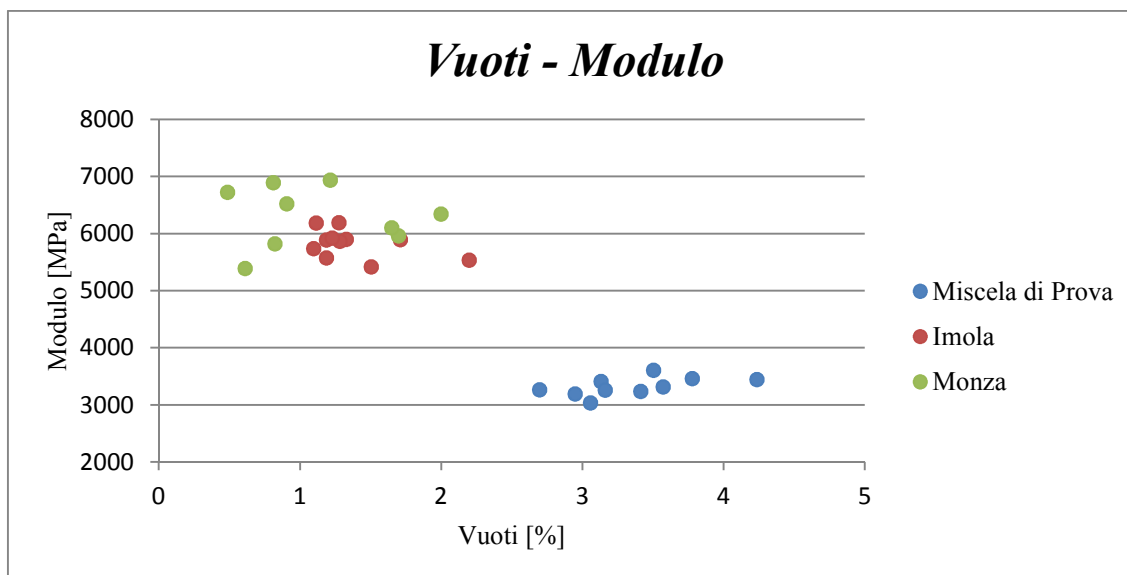


Immagine 5.3: Rigidezza a 20°C - % Perdita in Peso

Attraverso lo studio delle tre relazioni dei risultati ottenuti tramite i test di laboratorio, si è potuto facilmente desumere come la perdita in peso sia strettamente connessa alle caratteristiche volumetriche (percentuale dei vuoti) e a quelle meccaniche (rigidezza a 20°C) che caratterizzano la miscela analizzata.

Nasce quindi l'esigenza di specificare, calibrare ed infine corroborare un modello che colleghi queste tre grandezze e dia come risultato un preciso valore della perdita in peso della determinata miscela bituminosa. Nel caso si riesca a trovare una corrispondenza o una formula che leghi la perdita in peso alle caratteristiche meccaniche e volumetriche del conglomerato bituminoso, allora essa si potrebbe utilizzare come verifica delle miscele impiegate negli autodromi e come controllo e monitoraggio delle loro condizioni.

Nella fase di specificazione, sono state scelte come variabili il modulo di rigidezza dei provini (M) e la loro percentuale dei vuoti (V). Tali variabili sono state usate in due tipi di modello differenti: nel primo, di tipo lineare, la somma del modulo di rigidezza e la percentuale dei vuoti, moltiplicati per appositi coefficienti dimensionali e correttivi, dà come risultato la perdita in peso (in percentuale) della miscela analizzata; nel secondo modello scelto, invece, di tipo logaritmico, la perdita in peso del conglomerato bituminoso è ottenuta mediante la somma del logaritmo del suo modulo di rigidezza e della sua percentuale dei vuoti, entrambi moltiplicati per appositi coefficienti.

I due modelli saranno quindi così strutturati:

$$\begin{array}{l} \text{Modello} \\ \text{Lineare} \end{array} \quad PL = \left[ \left( \frac{a}{b} \right) \cdot e \cdot (1 - d) \right] M + \left[ \left( \frac{a}{c} \right) \cdot f \cdot d \right] V \quad [5.1]$$

$$\begin{array}{l} \text{Modello} \\ \text{Logaritmico} \end{array} \quad PL = \left[ \left( \frac{a}{b} \right) \cdot e \cdot (1 - d) \right] \log M + \left[ \left( \frac{a}{c} \right) \cdot f \cdot d \right] V \quad [5.2]$$

*Con:*

*a = coefficiente da applicare alla Miscela di Prova [adimensionale]*

*b = coefficiente da applicare alla miscela di Imola [adimensionale]*

*c = coefficiente da applicare alla miscela di Monza [adimensionale]*

$d$  = coefficiente di peso [adimensionale]

$e$  = coefficiente da applicare al Modulo di Rigidezza ( $M$ ) della miscela [ $\text{MPa}^{-1}$ ]

$f$  = coefficiente da applicare alla Percentuale dei Vuoti ( $V$ ) della miscela [adimensionale]

Compiuta la fase di specificazione del modello, si procede quindi alla calibrazione, ovvero allo stimare il valore dei coefficienti incogniti ( $a-f$ ) che compaiono in esso. Si ottiene una buona calibrazione quando il modello fornisce, per un determinato campione, un risultato della perdita in peso vicino a quello ottenuto in laboratorio.

Dopo la calibrazione si procede con la corroborazione, indispensabile per ottenere la giusta precisione del modello. Infatti in questa fase, in cui si cerca di migliorare le prime approssimazioni fatte ai coefficienti stimati nella calibrazione, si vogliono ottenere quei valori tali affinché il modello funzioni per tutti i provini esaminati in laboratorio e, quindi, divenga una formula generale ed esatta. Tale procedimento si effettua attraverso lo studio della somma degli scarti quadratici medi di tutti i provini, ovvero tramite la somma delle differenze dei risultati ottenuti dal modello e quelli ottenuti in laboratorio. Durante la corroborazione, si cerca di rendere minima tale somma, in modo tale che i due risultati siano il più possibilmente vicini per tutti i campioni analizzati e che il modello risulti quindi essere veritiero. È da sottolineare che, se si vuole ottenere un modello realistico, bisogna munirsi di un numero elevato di campioni, in modo tale da poter avere una verifica e una conferma sufficiente del modello stesso.

I risultati dei coefficienti verranno rappresentati nella tabella seguente:

	Modello Lineare	Modello Logaritmico
a	0,817	1,192
b	0,751	1,719
c	1,221	3,018
d	0,001	0,782
e	1,456	0,288
f	0,417	0,407

5.4: Coefficienti Modello

I coefficienti  $a$ ,  $b$ ,  $c$  dipendono dal tipo della miscela impiegata, e, soprattutto, dalla qualità e dalle caratteristiche degli aggregati. Aggregati di tipo basaltico e porfirico (costituenti la Miscela di Prova e quella di Imola) presentano ingranamenti molto simili

e nettamente diversi dal tipo di ingranamento offerto dagli inerti di tipo calcareo (costituenti la miscela di Monza); da questo ne consegue che i coefficienti  $a$  e  $b$  siano simili tra loro e nettamente differenti dal coefficiente  $c$ .

Il coefficiente di peso  $f$  sottolinea invece che la perdita in peso è influenzata per il 60% dal valore della rigidezza dinamica della miscela bituminosa e per il 40% dalle sue caratteristiche volumetriche quali la percentuale dei vuoti. Questo dimostra che esiste una correlazione diretta e marcata tra la perdita in peso e le caratteristiche meccaniche della miscela.

Effettuate le tre fasi, si sono quindi ottenute due formule (una lineare ed una logaritmica) che esprimono la perdita in peso di una determinata miscela bituminosa in funzione delle sue caratteristiche volumetriche (percentuale dei vuoti) e meccaniche (modulo di rigidezza). Tali formule vengono evidenziate nella tabella seguente:

	Modello Lineare	Modello Logaritmico
Miscela di Prova	$PL = 4,9 \cdot 10^{-4}M + 0,49 V$	$PL = 0,55 \log M + 0,14 V$
Imola	$PL = 4,5 \cdot 10^{-4}M + 0,45 V$	$PL = 0,80 \log M + 0,20 V$
Monza	$PL = 7,4 \cdot 10^{-4}M + 0,74 V$	$PL = 1,40 \log M + 0,35 V$

5.5: Modello Lineare e Logaritmico

Il coefficiente di peso  $f$ , come detto, dimostra come la perdita di peso sia nettamente influenzato dal valore della rigidezza della miscela bituminosa.

Difatti, maggiore è il modulo dinamico del conglomerato alla temperatura di 20°C, maggiore è la perdita in peso. Questo è un aspetto molto importante ed è indice del fatto che, nonostante i conglomerati bituminosi più rigidi abbiano una buona resistenza ai picchi delle singole sollecitazioni, l'applicazione continua e ripetuta dei carichi porti ad un veloce deterioramento dei loro aggregati.

La rigidezza, come si è già evidenziato, dipende, più che dagli aggregati, dalla scelta del tipo di legante: difatti, i conglomerati bituminosi aventi come legante il bitume modificato *LOWVAL HM40* (prelevati dagli autodromi di Imola e di Monza) presentano una rigidezza dinamica nettamente maggiore rispetto alla Miscela di Prova avente un legante tradizionale *B 70-100*.

La scelta del legante, oltre che a condizionare la rigidità dinamica e la perdita in peso del conglomerato bituminoso, influisce nettamente anche sulla qualità di addensamento. Come già visto dalla figura 4.7, infatti, l'addensamento migliore, a parità di numero di giri, si ottiene con i conglomerati bituminosi prelevati dai circuiti di Monza e di Imola, mentre la Miscela di Prova si compatta in maniera più disomogenea e con circa 3-4 punti percentuali in meno.

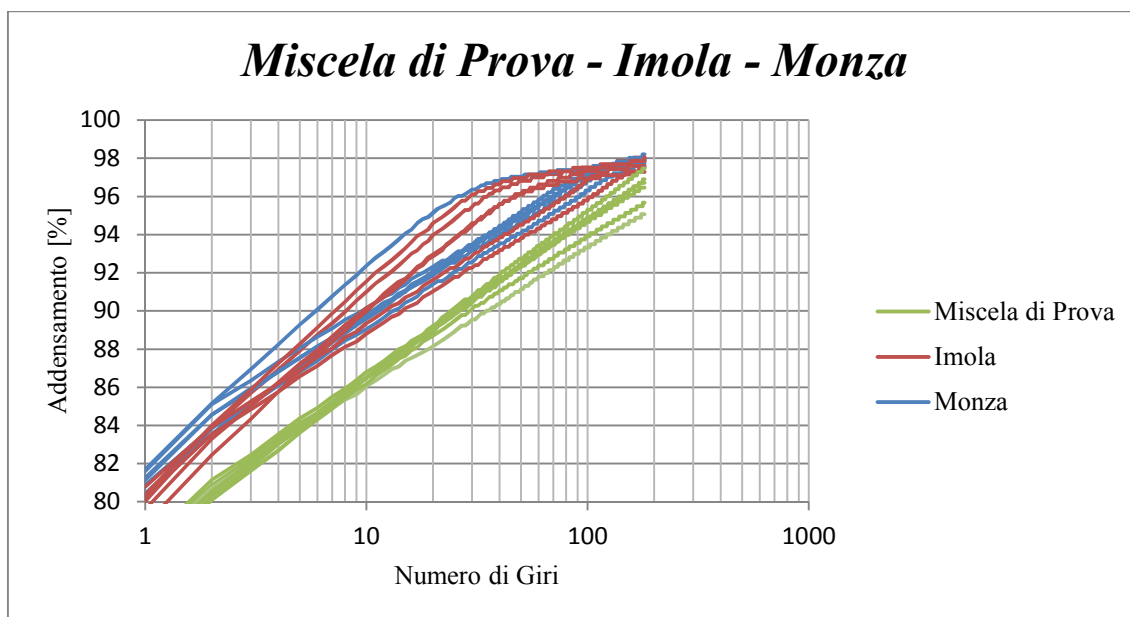


Figura 4.7: Confronto curve di addensamento dei tre conglomerati oggetto di studio

Per concludere, la scelta di inerti e legante di prima qualità porta al confezionamento di un conglomerato bituminoso avente una buona rigidità e quindi un'ottima resistenza alle singole sollecitazioni ma avente, al tempo stesso, un'elevata percentuale di perdita degli inerti dovuta ad un'applicazione continua e duratura dei carichi. Da ciò consegue che un elevato modulo di rigidità dinamica conferisce ottime risposte della pavimentazione stradale, ma anche continue opere di manutenzione atte ad evitare una massiccia e veloce perdita degli inerti; proprio per questo motivo, i circuiti automobilistici sono soggetti a continue stesure di conglomerato bituminoso nuovo.

In più, la scelta di una miscela bituminosa confezionata con un legante prestazionale, e quindi caratterizzata dall'elevata rigidità, porta ad una compattazione più omogenea, con il conseguente raggiungimento di un'ottima percentuale di addensamento già con pochi passaggi di rulli compattatori.

Anche la percentuale dei vuoti influisce, sebbene in maniera minore, sulla perdita di inerti della pavimentazione stradale, ed è quindi da tenere in considerazione nel campo della sicurezza degli autodromi. Miscele bituminose aventi un'elevata percentuale dei vuoti, sebbene portino ad una disgregazione degli aggregati più veloce, sono tuttavia da ritenere più sicure di quelle che ne sono prive, in quanto l'acqua tende a non stagnare sulla superficie e l'effetto aquaplaning risulta pertanto assente. La percentuale dei vuoti dipende non solo dalla scelta del legante, ma anche dalla curva granulometrica degli inerti.

In un circuito automobilistico, per una buona stesura di un conglomerato bituminoso dalle ottime caratteristiche prestazionali, bisogna quindi cercare di confezionare una miscela bituminosa che abbia le seguenti caratteristiche:

- Inerti dalle ottime caratteristiche prestazioni in grado di resistere alle alte sollecitazioni; tali aggregati devono essere preparati con una buona curva granulometrica, indispensabile per ottenere una sufficiente percentuale dei vuoti che garantisca l'aderenza anche in condizioni meteorologiche avverse e che favorisca una buona micro e macrotessitura.
- Un legante dalle elevate caratteristiche prestazionali che possa favorire il confezionamento di un conglomerato bituminoso dall'alto modulo di rigidità dinamica. Una buona rigidità porta ad ottime resistenze alle singole sollecitazioni ma anche ad una minore vita utile del conglomerato bituminoso stesso, il che comporta l'aumento dei controlli e delle stesure. Dall'altra parte, la scelta di un buon legante determina anche un addensamento più veloce ed omogeneo della miscela bituminosa, con evidenti vantaggi economici e di sicurezza.









## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Raveling of Hot-Mix Asphalt by Richard O. Wolters, P.E., Executive Director - Minnesota Asphalt Pavement Association.*
- [2] *Dispense del corso “Costruzione di strade, ferrovie ed aeroporti T”, prof .ing. Giulio Dondi, A.A. 2010-2011.*
- [3] *Dispense del corso “Tecnica Ed Economia Dei Trasporti T”, prof .ing. Luca Mantecchini, A.A. 2010-2011.*
- [4] *Stagni E., “Meccanica della Locomozione”, 1980*
- [5] *Pavement Condition Evaluation Manual - Highway Preservation Systems, Ltd.- 01/10/01.*
- [6] *Fia Norms, Revision 3 – IB – 29/11/94, pp. 5-6.*
- [7] *Revisione 002050-01-06 della società Eni S.p.A.*
- [8] *Revisione 2-04-10 della ditta Valli Zabban.*
- [9] *Rapporto analitico n° 100/2011 della ditta Valli Zabban.*
- [10] *Rapporto analitico n° 56/2010 della ditta Valli Zabban.*
- [11] *Rapporto analitico n° 82/2011 della ditta Valli Zabban.*



## **RIFERIMENTI NORMATIVI**

1. UNI EN 12697-1 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Soluble binder content –*
2. UNI EN 12697-5 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density –*
3. UNI EN 12697-6 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens –*
4. UNI EN 12697-8 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens –*
5. UNI EN 12697-17 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 17: Particle loss of porous asphalt specimen –*
6. UNI EN 12697-26 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness –*
7. UNI EN 12697-30: – *Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Part 30: Specimen preparation by impact compactor –*
8. UNI EN 12697-31: – *Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor –*
9. UNI EN 12697-33: – *Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Part 33: Specimen prepared by roller compactor –*
10. UNI EN 13036-1: – *Road and airfield surface characteristics – Test Methods – Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique –*

11. UNI EN 13036-3: – *Road and airfield surface characteristics – Test Methods – Part 3: Measurement of pavement surface horizontal drainability –*
12. EN ISO 3838: – *Crude petroleum and liquid or solid petroleum products – Determination of density or relative density – Capillary-stoppered pycnometer and graduated bicapillary pycnometer methods*